

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE ARCILLAS Y ARENAS SATURADAS SOMETIDAS A LA ESTABILIZACIÓN POR CONGELAMIENTO TEMPORAL

CAPITULO I CUERPO DEL PERFIL

1.1.- INTRODUCCIÓN

A la hora de realizar una excavación y conseguir estabilizar el suelo, aunque sea de forma provisional, una posibilidad consiste en congelar el suelo, especialmente cuando éstos son blandos y están saturados. Ello permite disponer de una pared provisional que impide el desmoronamiento del terreno evitando riesgos, bombeo y peligros en los trabajadores.

La congelación artificial del terreno se basa en el principio de convertir el agua intersticial en hielo, el cual actúa como elemento de unión de las partículas del suelo, con lo que se consiguen dos efectos: por una parte un aumento de la resistencia del terreno y por otra una completa impermeabilidad.

A pesar que en otros países el método se vuelve cada vez más utilizado, con el aumento progresivo de empresas que brindan un servicio exclusivo en la congelación mediante diversos métodos, debido a la falta de información técnica y la experiencia con este tipo de estabilización, hacen suponer que la misma no sea utilizada en nuestro medio, por lo que se pretende cambiar esta situación marcando precedente para incentivar estudios más avanzados.

El impacto del método es tal en países más desarrollados que expertos como el DR. Ingeniero en caminos **F. Muzás Labad afirman:** “En el momento presente puede afirmarse que la congelación del terreno es una técnica altamente fiable, que permite resolver problemas difíciles y que incluso puede competir económicamente, en ciertos casos, con otras técnicas tradicionales.”

Por lo mencionado anteriormente se pretende en el presente trabajo realizar el análisis de la resistencia que adquieren las arcillas y arenas al ser congeladas mediante cámaras de refrigeración a diferentes temperaturas, así también analizar los cambios volumétricos que sufren los suelos y su posible incidencia en su aplicación, además se mostrará los métodos y equipos actualmente utilizados para la congelación en campo así como antecedentes de la aplicación en diferentes tipos de obras.

El autor del presente trabajo aportará una alternativa que brindará seguridad en obras subterráneas para que las empresas pongan en consideración el método, dando el primer paso de investigación en el amplio tema.



1.2.- DISEÑO TEÓRICO

a) PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

- **SITUACIÓN PROBLÉMICA**

En las construcciones civiles cuando los terrenos son inestables en particular los arcillosos y arenosos, las excavaciones profundas se hacen difíciles y casi imposibles además de la existencia de peligros inminentes en el personal de trabajo, estos tienen el doble de probabilidades de morir que en otro tipo de construcción, especialmente en suelos inestables y saturados donde se pueden presentar: derrumbes, atmósferas peligrosas a causa de gases inflamables, inundación provocando el ahogamiento o intoxicación de aguas contaminadas, por tales motivos la necesidad de plantear una alternativa de solución que aún no es utilizada en nuestro medio, que brinde estabilidad, impermeabilidad y seguridad al personal, con el inicio del estudio de las características resistentes que brinda el método: la congelación de suelos.

- **PROBLEMA**

¿Cuál será el comportamiento de la resistencia a compresión que tienen las arenas y arcillas saturadas, al ser sometidas a la estabilización por congelamiento temporal?

b) OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN

- ✚ **OBJETIVO GENERAL:**

Analizar el comportamiento de la resistencia a compresión de las arcillas y arenas saturadas, sometiendo las mismas a pruebas de laboratorio y cámaras de refrigeración a diferentes temperaturas con el fin de estabilizar los suelos temporalmente mientras se realicen excavaciones en condiciones de seguridad.

- ✚ **OBJETIVOS ESPECÍFICOS:**

- Hacer un relevamiento histórico, y un estudio profundo de la teoría de la congelación de suelos.
- Ubicar las zonas de donde se extraerá las muestras, bajo criterios de muestreo para su posterior caracterización.
- Someter las arcillas y arenas saturadas a cámaras de refrigeración a diferentes temperaturas variando las densidades intermedias de compactación para arcillas para su posterior rotura.
- Analizar las resistencias, cambios volumétricos, tipo de rotura comparando los fenómenos entre las arcillas y arenas estudiadas.
- Análisis de las ventajas y desventajas del método con relación a métodos convencionales en la prevención de accidentes y medidas de seguridad en excavaciones subterráneas.

c) HIPÓTESIS

Sometiendo a las arcillas y arenas saturadas a la congelación a temperaturas que oscilan entre 0 y -17 grados centígrados, se logrará aumentar su resistencia determinando mediante pruebas de laboratorio, sus valores del comportamiento de la resistencia a compresión, en condiciones de densidades intermedias de los suelos.

d) VARIABLES INDEPENDIENTES Y DEPENDIENTES:

Variable Independiente:

V1= Temperatura

V2 Energía de compactación

Variable Dependiente:

V2= Valores de la resistencia a compresión

V2= Cambios volumétricos

Operacionalización (pg. sigte)

TIPO DE INVESTIGACIÓN:

La investigación que se realizará en el presente documento es del tipo exploratoria ya que el proceso de congelación de suelos, como sus características físico resistentes es poco conocida en nuestro medio.

OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Variable Nominal	Conceptual	OPERACIONALIZACIÓN		
		Dimensión	Indicador	Valor acción/ Técnicas
V1: temperatura	Se refiera al sometimiento de las arcillas y arenas al congelamiento temporal	Arcillas	Caracterización del suelo	Humedad natural
				Granulometría
				Plasticidad
		Arenas	condición del suelo para su congelación desde 0 a -17 grados	Compactación
				CBR
				Permeabilidad
Arenas	caracterización del suelo	Saturación del suelo y congelamiento en cámaras de refrigeración		
		Humedad natural		
		Granulometría		
Arenas	condición del suelo para su congelación desde 0 a -17 grados	Peso específico		
		Saturación del suelo y congelamiento en cámaras de refrigeración		
V2= energía de compactación	Se refiere al número de golpes, capas y todo lo referente a la energía, que se aplicara en el suelo para su congelación.	Arcillas	Densidades intermedias	Compactación: 12-25 golpes
V2: Valores de la resistencia a compresión	Se refiere a la obtención de la resistencia de los suelos congelados	Arcillas congeladas a temperaturas variadas	Resistencia compresión	a Rotura a través de equipo de compresión
		Arenas congeladas a temperaturas variadas	Resistencia compresión	a Rotura a través de equipo de compresión
V2= Cambios volumétricos	se refiere a la expansión que sufren los suelos al ser congelados	arenas y arcillas	volúmenes iniciales y finales	Medidos antes y después de ser congelados

1.3.- DISEÑO METODOLÓGICO

1.3.1 CRITERIOS DE RELEVAMIENTO

RECONOCIMIENTO DE LOS POSIBLES SITIOS PARA LA EXTRACCIÓN DE MUESTRAS

Mediante información brindada por la alcaldía del departamento, se pudo constatar que no existen bancos de préstamo arcillas, lo común son las gravas y arenas, por tal motivo las arcillas serán extraídas por criterio del autor de las siguientes zonas de la ciudad donde se observan suelos arcillosos en gran magnitud:

Zona PARADA DEL NORTE



Zona Quebrada el monte



Arenas:

ZONA QUEBRADA EL MONTE

En la zona quebrada del monte también se observó que el contenido de arena, por lo que también se extraerá dicho material de la zona



ZONA LA PINTADA-RIO SANTA ANA



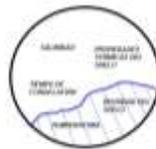
1.3.2 UNIDADES DE ESTUDIO Y DECISIÓN MUESTRAL

➤ **Unidad de Estudio:**

Comportamiento de la Rc de suelos congelados

➤ **Población – Muestra:**

Factores que influyen en la RC



Muestra

1.3.3 CRITERIOS A ESTABLECER

1.3.3.1 DE MUESTREO

El objetivo del muestreo es realizar una extracción del material arcilloso y arenoso adecuado y representativo para poder utilizar el mismo suelo para realizar todos los ensayos deseados.

Equipo necesario.

Es necesario para la extracción de las muestras los siguientes materiales.

- Pala y picota



- Bolsas azucareras debidamente identificadas bolsas impermeables para el %W



- Metro.



- Cámara fotográfica HD



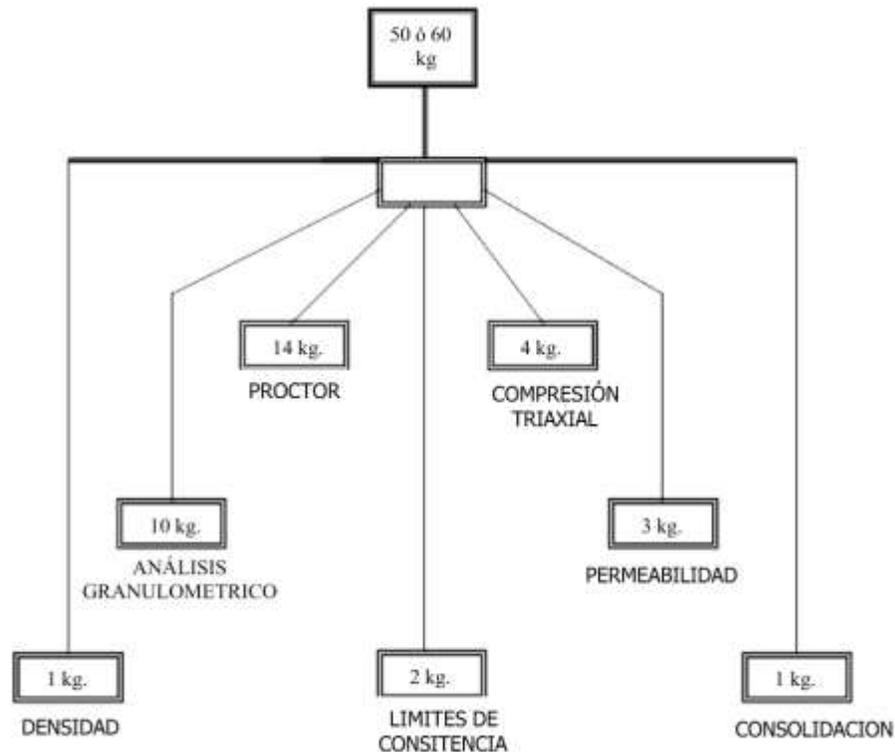
Se debe retirar el material que se encuentra en la superficie para así evitar que se mezcle con otros materiales no adecuados.

Se excavará en el rango de 0-1m para poder tener un suelo con una humedad natural y representativo realizando calicatas de exploración en cada área de estudio, con el fin de realizar una inspección visual, determinando la calicata que represente el suelo más homogéneo para los fines del estudio.

NÚMERO Y MASA DE LA MUESTRA DE CAMPO.

La cantidad de suelo que hay que enviar al laboratorio depende del programa de pruebas, y debe ser suficiente para repetir los ensayos cuyos resultados se juzguen incorrectos ó dudosos. Las muestras alteradas usuales en estudios de materiales provenientes de un banco de préstamo pueden constar de 50 a 60 kg de material.

El siguiente esquema dá una idea de la forma en la que se reparte una muestra de este tipo en el laboratorio, y de las cantidades que se necesitan para cada prueba.



REPARTICIÓN DE UNA MUESTRA EN LABORATORIO, SEGÚN LA PRUEBA

TRANSPORTE DE MUESTRAS

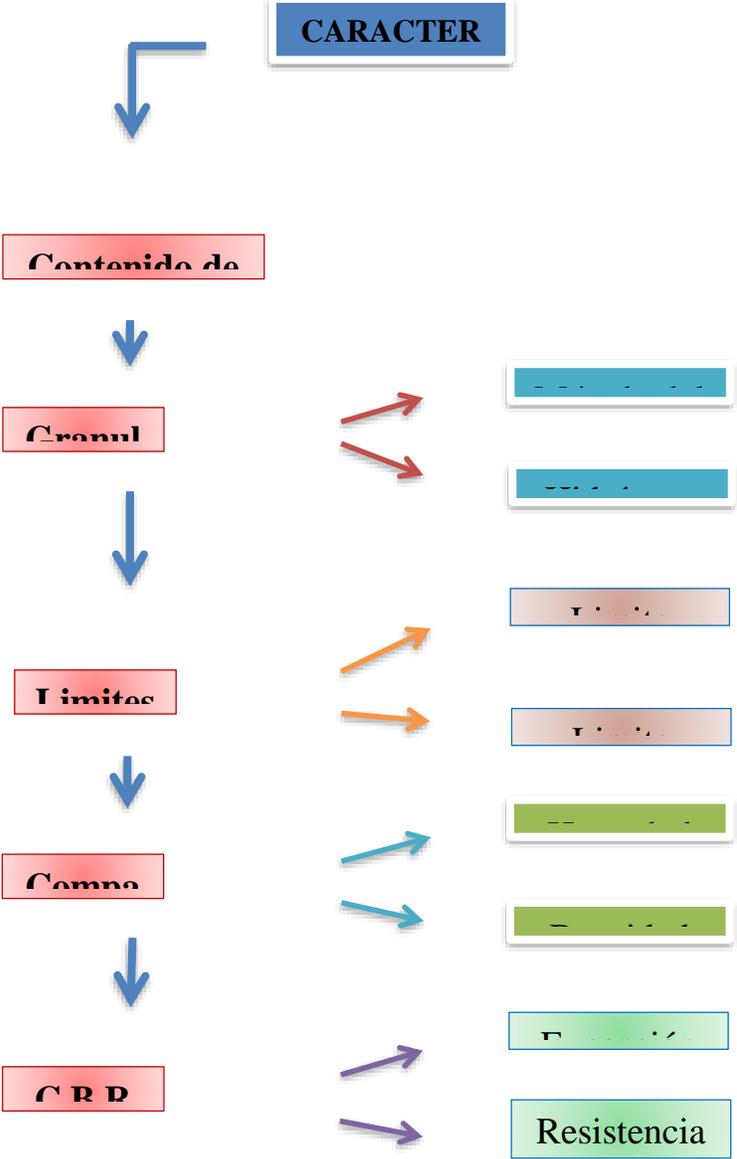
Se transportará los agregados en sacos u otros recipientes construidos para prevenir la pérdida o contaminación de alguna parte de la muestra o daño durante el despacho.

Se deben facilitar los siguientes informes: los recipientes de transporte para muestras deberán tener una adecuada identificación individual, pegado y deben estar adjuntos en un reporte de campo, informe fotográfico, e informe del ensayo.

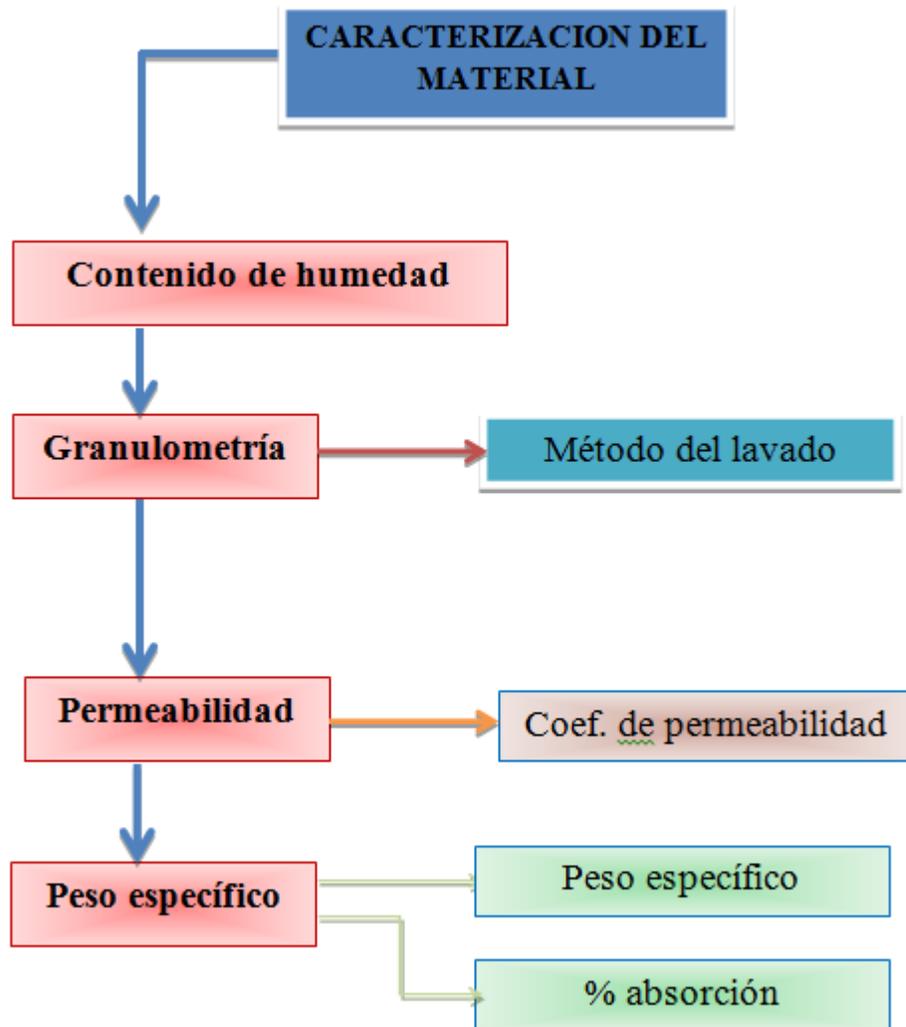
1.3.3.2 DE CARACTERIZACIÓN

- ARCILLAS

Se procederá a realizar la caracterización de los materiales de acuerdo con los ensayos normativos mostrados en el siguiente esquema.



ARENAS



1.3.2 MÉTODOS Y TÉCNICAS EMPLEADAS

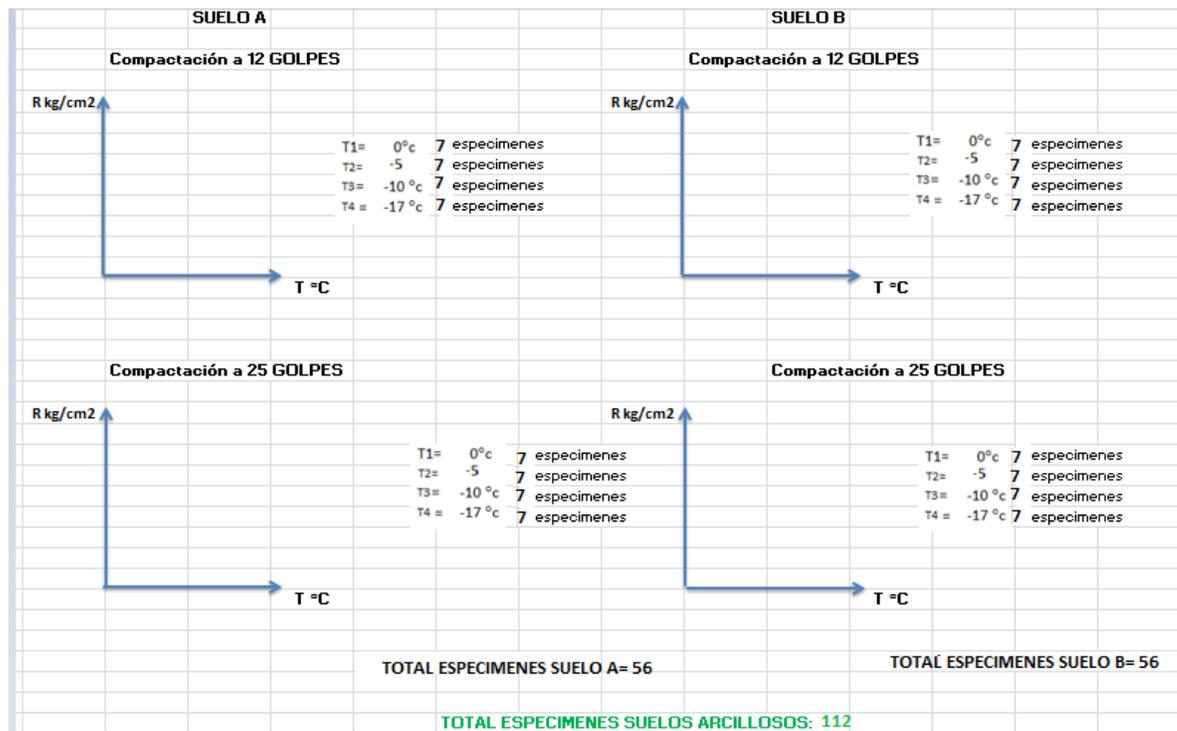
Para determinar el comportamiento de las arcillas y arenas saturadas, se seguirá un procedimiento a criterio del autor, ya que al ser una investigación exploratoria, en nuestro medio no se cuenta con equipos normalizados, ni procedimientos.

1.3.2.1 ESTRATEGIA METODOLÓGICA:

Arcillas

- Las arcillas serán sometidas a compactaciones intermedias para simular la condición natural del terreno, con una energía para 12 golpes y 25 Golpes
- Se trabajará con un mínimo de 3 temperaturas, preferentemente a: 0°C -5 -10°C y -17°C
- Se trabajará con arcillas de dos sitios como se indicó anteriormente.

El número mínimo de ensayos se lo determina en función a los resultados esperados, Por lo que se tendrá la siguiente distribución de ensayos para rotura de probetas dependiendo del número de golpes y la temperatura.

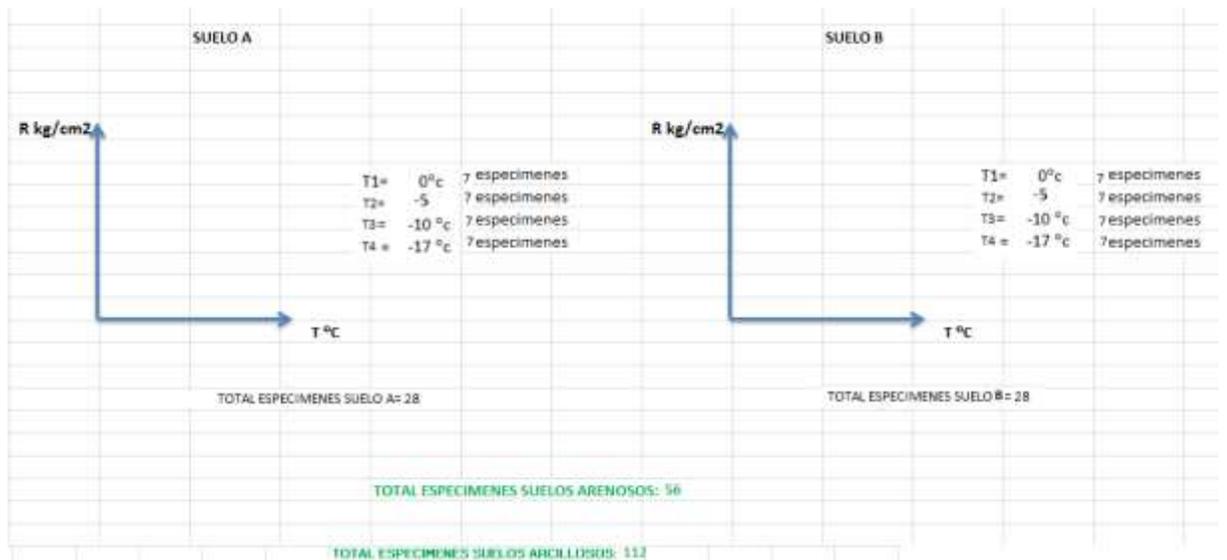


ARENAS

- Las arenas serán saturadas y congeladas
- Se trabajará con un mínimo de 3 temperaturas, preferentemente a: 0°C -5 -10°C y -17°C

- Se trabajará con arenas de los dos sitios mencionados.

Se sigue el mismo lineamiento para determinar el número de probetas.



Para obtener sus esfuerzos máximos a humedad óptima se realizarán 45 probetas para los suelos arcillosos.

NÚMERO TOTAL DE ESPECÍMENES DE LA INVESTIGACIÓN: "213 Especímenes"

1.3.2.2 PROCEDIMIENTO DETALLADO A SEGUIR:

Una vez que se realice la caracterización de los suelos en estudio, se seguirá los siguientes pasos:

Para Arcillas:

- Se molerá la arcilla para su posterior tamizado.
- Se engrasará el molde para su posterior extracción del espécimen con el extractor.
- Se compactará las arcillas para una energía de compactación con 12 golpes para unas muestras y 25 para otras.
- Se procede a extraer el espécimen del molde con la ayuda del extractor.
- Los especímenes pasarán a ser saturados durante 24,48, o 72 hrs de acuerdo a la evaluación de la saturación que se realizará.
- Una vez transcurrido su tiempo de saturación, los especímenes serán trasladadas a la cámara de refrigeración marca insolcruz de fridosa Tarija, donde serán medidos y posteriormente congelados durante un tiempo de 48 hrs, y se las retirará cuando la cámara registre la temperatura deseada.
- Los especímenes serán trasladados en conservadoras al laboratorio de Ing. civil. de la U.A.J.M.S para su inmediata rotura.

Para Arenas

- En primer lugar la arena será saturada durante 24 horas.
- La arena saturada será introducida a los moldes de madera que estarán cubiertos por plástico impermeable para que no pierda su humedad.
- Los especímenes en sus respectivos moldes serán trasladados a la cámara de refrigeración.
- Luego de cierto tiempo, cuando el espécimen gane cierto grado de rigidez, se procederá a extraer el espécimen de su molde especial y será dejado en la cámara durante 48 horas.
- Los especímenes serán retirados cuando la cámara marque la temperatura deseada, y se procederá a su traslado en conservadoras al laboratorio para su inmediata rotura.

EQUPOS A USAR:

CÁMARA DE REFRIGERACIÓN





INTERIOR DE LA CÁMARA

PUERTA DE SEGURIDAD

CONTROL DE TEMPERATURA

La cámara marca insolcruz de fridosa de tarija, oscila entre temperaturas de 0°C hasta -20°C, en la cuál serán introducidos los espécimenes para su respectiva congelación.

Equipos para preparación de arcillas



Equipo de compactación



Extractor de muestras

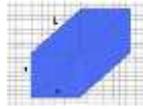
EQUIPO DE COMPRESIÓN 2000 Libras (disponible en el laboratorio de la U.A.J.M.S)



Equipo de preparación de material para Arenas

Se usará un molde de madera construido por el autor preferentemente de dimensiones:

a= 8cm



b=8cm

L= 12cm

El molde estará construido de tal manera sea fácilmente desmontable para la facilidad al momento de extraer el espécimen cuando obtenga cierto grado de rigidez en la cámara.

1.3.3 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN

El procesamiento de datos será desarrollado a medida que se obtengan los resultados de los esfuerzos.

Se realizarán gráficas exponenciales, polinómicas, logarítmica, ó potencial para la obtención de curvas resistencia vs temperatura.

Se evitarán las gráficas lineales que podrían darse en caso de una depuración masiva de los datos, en caso de darse, se realizarán nuevamente las pruebas comprometidas ante la duda de la veracidad de los datos. Para esto es esencial cumplir con el cronograma, realizando el respectivo análisis a medida que se obtengan los datos para tener el tiempo suficiente de repetir pruebas cumpliendo el cronograma de ejecución.

Se realizarán comparaciones entre los dos suelos arcillosos, y entre los dos suelos arenosos, determinando los factores que influyen su resistencia variada y por qué, en caso de ser relativamente similares.

También se comparará los suelos arcillosos vs arenosos, determinando cuál es el que más se adapta al método y en qué condiciones resulta favorable ó desfavorable.

Se compararán gráficas de rotura, evaluando el tipo de falla producida ante la rotura de los especímenes, así como su comportamiento.

1.3.4 CRITERIOS DE DEPURACIÓN DE DATOS:

Para la depuración de datos en el caso de las probetas tanto para arenas y arcillas; se tomará en cuenta el comportamiento de las mismas en las curvas esfuerzo vs deformación; las curvas que tengan un comportamiento diferente a la tendencia de la mayoría serán depuradas, tomando en cuenta que el número mínimo de ensayos

para realizar el promedio de esfuerzos es 3; si el número es menor, se deberá repetir los ensayos.

También se tomará en cuenta para la depuración la deformación que se presenta en el esfuerzo máximo, si estas se encuentran muy desplazadas a pesar de que tengan el mismo comportamiento igualmente serán depuradas.

1.3.5 ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

El alcance de la investigación comprende:

CAPITULO I

- Resolver la incertidumbre de un fenómeno que nace de una pregunta fundamentada por una hipótesis y variables operacionales.

CAPITULO II

- Plasmar la teoría básica y seleccionada de la congelación de suelos incluyendo antecedentes de investigación y aplicación.

CAPITULO III

- Realizar el relevamiento de información de lugares seleccionados a criterio del autor para su posterior caracterización y pruebas de resistencia de especímenes en estudio.

CAPITULO IV

- Determinación de curvas de resistencia vs temperatura para los diferentes suelos en estudio, para su posterior análisis y comparación.
- Análisis de los posibles problemas que puedan ocasionar los cambios volumétricos en las obras subterráneas.

CAPITULO V

- Realizar las conclusiones y recomendaciones de la investigación.

CAPITULO II ESTADO DE CONOCIMIENTO:

2.- FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA:

2.1 MARCO HISTÓRICO:

2.1.1 HISTORIA DE LA CONGELACIÓN DE SUELOS

Una de las primeras aplicaciones de la congelación artificial para excavaciones fue en Inglaterra en 1862. Para excavar un pozo en arenas movedizas, se enterró una serie de tuberías, por las cuales se hizo circular salmuera congelada por una máquina a éter. El pozo fue trazado y excavado sin dificultad.

En 1883 un ingeniero alemán, F. H. Poetsch, usó un proceso de congelación para excavar un ducto en la Mina Archibald en Saxony. Desde entonces, el progreso ha sido principalmente en el mejoramiento de su técnica. El proceso de Poetsch se utiliza hoy en día en casi todos los proyectos de congelación de suelos. En el pozo de la Mina Archibald, todas las tuberías de congelación fueron colocadas en el interior del área a ser excavada. Cuando las tuberías fueron destapadas, no lograron mantener por mucho tiempo la pared de hielo. Hoy, por lo general son colocadas fuera del área de excavación.

En 1959 el desarrollo de yacimientos de potasio en la provincia de Saskatchewan (Canadá) exigió la excavación de pozos profundos, aproximadamente 1.100 metros de profundidad. La estratigrafía del terreno indicaba la presencia de tres amplios estratos acuíferos e incompetentes. Métodos convencionales de perforación de pozos fallaron. Pero la congelación fue un éxito. Por lo menos ocho proyectos de minería desde entonces han hecho uso de la congelación en la construcción de pozos.

Mayoritariamente la congelación de suelos ha sido aplicada a faenas de excavación en proyectos de construcción; pero también ha sido usada para otro tipo de aplicaciones, por ejemplo para construir grandes cavidades subterráneas, para el almacenaje de gas líquido, de esta forma las paredes congeladas adyacentes a los contenedores del gas líquido, reducen al mínimo la posibilidad de ebullición del material.

2.1.2 ANTECEDENTES DE INVESTIGACIÓN

No se existe un antecedente de investigación en el departamento de Tarija referente al tema, más si existe mucha información en países del viejo continente, como en el norte del nuestro.

Algunos de los estudios de donde se proyectó la investigación del tema son:

Congelación Artificial del terreno; **F. Muzás Dr. Ingeniero de Caminos Valencia octubre de 2012**

Congelación Artificial de dos suelos naturales, un enfoque experimental con desarrollo de equipo; Ing. **Pealez Nova Febrero 2013**

2.2.- MARCO TEÓRICO

2.2.1 La Congelación de suelos:

La congelación de suelos es una estabilización temporal del terreno, el cual es llevado a temperaturas bajas, solidificándose en macizos de alta capacidad de soporte que lo convierten en autoportante y le permiten servir de muro de contención de los suelos adyacentes. La congelación comprende dos etapas: la fase activa en la cual el suelo se congela y la fase pasiva en la cual se requiere mantener el suelo en su estado congelado. Durante la fase pasiva la energía necesaria para el funcionamiento del sistema se reduce en aproximadamente 50 a 70% con respecto del máximo de la fase activa.

Se dice que es un proceso temporal y ambientalmente amistoso, ya que una vez retirado el sistema refrigerante el terreno vuelve a su situación original, sin generar cambios ni daños en él.

Generalmente, la congelación se emplea en excavaciones en suelos blandos saturados. La congelación depende de las características geológicas e hidrológicas del terreno, y los tipos de suelo presentes, sus propiedades térmicas y contenido de agua.

Una condición para la aplicación del proceso de congelación es el suficiente grado de saturación que debe tener el suelo, ya que la resistencia que alcanza un terreno congelado disminuye si el grado de saturación es menor. En suelos exclusivamente húmedos se puede alcanzar, por medio de la congelación, sólo un efecto de impermeabilización.

Es necesario realizar análisis geológico, térmico e hidráulico del terreno, para determinar las condiciones en que se deberá congelar, porque si bien es cierto se puede practicar el método casi sin excepción, para cada terreno se toman distintas medidas dependiendo de las características inherentes de cada lugar, muy particulares de cada terreno. Una vez que se realizan todos los análisis, y se determina el tipo y condiciones del sistema de refrigeración a utilizar, se pueden ver in situ las grandes bondades que tiene el uso de estas tecnologías.

“El suelo congelado advierte, comparado con un estado no congelado, mayor resistencia y disminución de la permeabilidad. Por lo tanto, mientras menor sea la temperatura de congelación, el suelo se hará más resistente y más impermeable. “

2.2.2 VENTAJAS DE LA ESTABILIZACIÓN:

Como se ha dicho anteriormente, la congelación de suelos es un método que resulta ser una excelente solución para proyectos en los que el suelo es incompetente y además se encuentra

en condiciones de saturación. Asimismo, como es una técnica que ha sido trabajada desde hace más de cien años, los progresos en ella son muchos, lo que ofrece una gran variedad de aplicaciones y posibilidades para los distintos tipos de terreno y proyectos a ejecutar. Las tecnologías que hoy en día se utilizan son muy avanzadas, y se han ido adaptando para abarcar todo el mercado, es decir puede usarse en trabajos de pequeña, mediana y gran envergadura. Dentro de las ventajas que ofrece esta metodología se pueden citar:

- Corta con eficacia el flujo de aguas subterráneas, eliminando las faenas de bombeo de napas o pavimentar con hormigón sellado para llevar a cabo diversos proyectos.
- La congelación se puede realizar en todo tipo de suelo y condiciones de aguas subterráneas, controlando arena, arcilla, turba, grava, etc.
- Vibraciones y ruidos muy bajos durante la instalación del sistema de tuberías, lo que lo hace una excelente alternativa en sitios sensibles cerca de edificios o estructuras existentes.
- Fácilmente instalable alrededor y debajo de obras hidráulicas existentes, permitiendo su empleo continuo sin la interrupción de los servicios.
- No es susceptible a ser afectado por interrupciones del suministro eléctrico ya que el apuntalamiento congelado puede permanecer estable durante semanas sin estar conectado.

2.2.3 SISTEMAS DE CONGELACIÓN:

La mayor parte de los sistemas de congelación de suelos son bastante similares en su principio, con diferencias sutiles en los aspectos ingenieriles de cada terreno en particular. El componente más importante de este método es el sistema de congelación, consistente en una serie de tuberías, instaladas con varias técnicas de perforación.

La cantidad, el espaciado, la profundidad y el tamaño de las tuberías de refrigeración son únicos para cada terreno, y determinados sobre la base de las propiedades térmicas e hidráulicas de los suelos, programación de la obra de construcción y su rentabilidad

Para llevar a cabo la congelación se introducen en el suelo las llamadas Tuberías de Congelación, a través de las cuales circula una sustancia fría para extraerle el calor al suelo y congelar así el agua subterránea. Para la fabricación de frío existen dos tipos de procedimientos: mediante gases líquidos y mediante aparatos de refrigeración que usan sustancias alcalinas (salmueras) como portador de frío.

Dentro de cada una de las tuberías de congelación, se instala otra cañería alimentadora, la cual es de menor diámetro y permite la circulación del medio congelante que fluye a la superficie a través del anillo de la tubería más grande. El medio congelante varía según la

aplicación requerida. En proyectos que se requiere que la congelación sea muy rápida, como por ejemplo para la contención del terreno después de un desmoronamiento, el nitrógeno líquido es usado con temperaturas menores a -150°C . Sin embargo, para la mayor parte de los trabajos se usa las sustancias alcalinas, por su menor costo.

2.2.3.1 Congelación del Suelo Mediante Salmuera:

Este método utiliza un refrigerante secundario, la salmuera. Este refrigerante secundario es enfriado usando grandes plantas de refrigeración portátiles que emplean el Amoníaco (NH_3) como un refrigerante primario. Estas plantas de refrigeración comúnmente son montadas sobre remolques convencionales, y como fuente de poder utilizan la electricidad disponible en el comercio o por generadores diesel. En su gran mayoría tienen el mismo funcionamiento.

En un compresor se condensa y se calienta el Amoníaco. En un condensador se enfría el gas altamente comprimido y se vuelve líquido. Este líquido que está bajo una presión muy fuerte, se distiende en el vaporizador y produce con ello un enfriamiento del sostenedor de frío llamado Salmuera que generalmente es una solución al 30% de Cloruro de Calcio o de Glicol de Etileno, que tienen un punto de congelación de aproximadamente -55°C y -50°C , respectivamente.

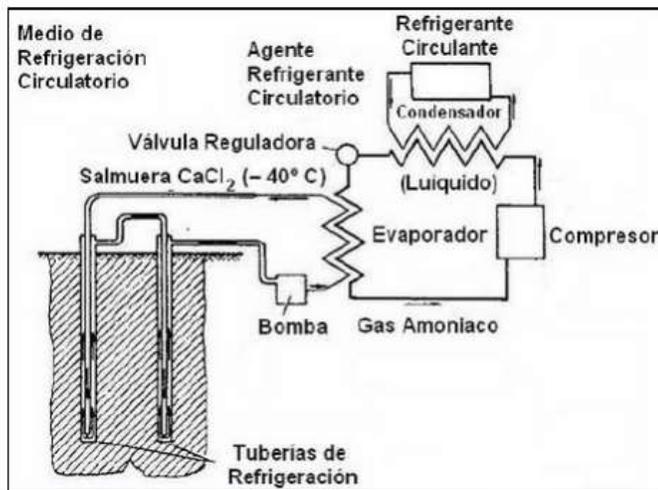


FIGURA: Principio de congelación mediante salmuera de calcio

La salmuera va circulando por una serie de tuberías de acero, las cuales se encuentran confinadas y enterradas en el terreno. Todo el sistema de tuberías está dispuesto con cañerías dobles de acero, es decir dos tubos de distinto diámetro uno al interior del otro. La salmuera circula a una temperatura de aproximadamente -23 a -29°C , a lo

largo del tubo exterior y por sobre el interior, congelando así todo el suelo en contacto con el sistema.

La ventaja que presenta la congelación del suelo mediante salmuera es su gran economía, por lo que se recomienda su uso en la fase pasiva, es decir para la mantención de los cristales de hielo.

Por otro lado, este método de congelación de suelo es confiable y seguro ecológicamente, ya que el cloruro de calcio no es tóxico al rociarlo sobre cualquier tipo de terreno en cualquier estado. A través de numerosas mejoras a los equipos necesarios para congelar el suelo con este tipo de método, se ha hecho que sea un sistema cada día más eficiente y más rentable.

2.2.3.2 Congelación del Suelo con Gas Líquido:

Para la congelación con gas líquido, generalmente nitrógeno líquido, el gas es llevado directamente desde un camión aljibe a las tuberías de congelación. El punto de congelación del nitrógeno líquido es de -196°C , temperatura considerablemente más baja que la de la salmuera. Debido a esto el tiempo de congelación en el procedimiento por medio de nitrógeno líquido, se reduce a un quinto. Así este método es muy indicado de ser usado para apuntalar excavaciones, en zanjas y hendiduras como también en aguas subterráneas con mucha corriente.

En proyectos, en donde la congelación se debe mantener por un tiempo muy prolongado, este proceso por gas se vuelve muy poco rentable.

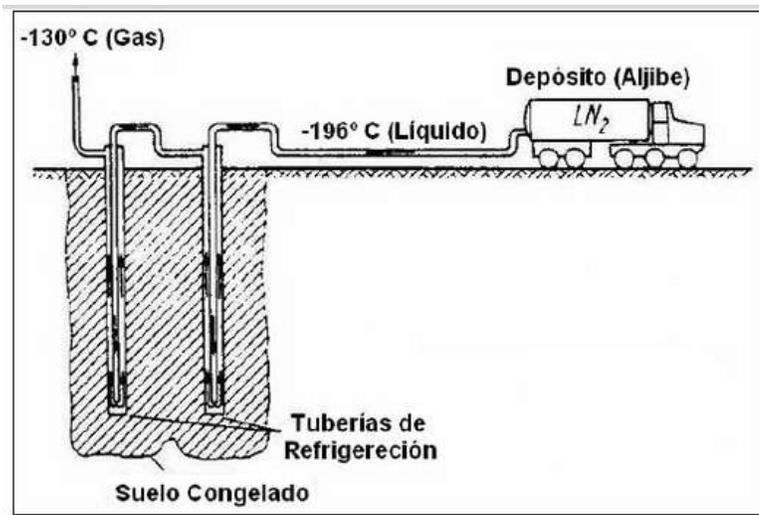


FIGURA: Principio de congelación mediante nitrógeno líquido

El nitrógeno líquido fluye por las tuberías de congelación desde el camión aljibe totalmente vaporizado enfriando el terreno en contacto con las tuberías. Después de un momento el suelo en contacto con el sistema comienza a congelarse, formando aproximadamente en una semana una pared de hielo muy hermética y cerrada de un diámetro cercano a 1 metro.

La fase activa, donde se forma el muro congelado, normalmente dura 4 a 7 días. El consumo total de nitrógeno líquido en esta etapa es aproximadamente 1.500 a 2.500 litros de gas para 1 m³ de terreno congelado. Las influencias geológicas (las procedencias termales, el flujo de agua, etcétera) pueden influenciar este valor.

En la fase pasiva, de mantenimiento, la inyección de nitrógeno líquido disminuye, y el terreno congelado deja de crecer conservando su volumen. Para mantener 1 m³ de terreno congelado se necesitan cerca de 90 litros de nitrógeno líquido diario.

La ventaja que presenta la congelación del suelo mediante nitrógeno líquido es su muy bajo punto de congelación, lo que permite que en muy poco tiempo se logre el estado congelado del suelo, por lo que se recomienda su uso en la fase activa, es decir para la formación de las paredes congeladas.

La ubicación superficial y la instalación de las tuberías de congelación son predominantemente basadas en la geometría de la zona que requiere la congelación. El espaciado entre dos tuberías de refrigeración adyacentes y la profundidad de cada

tubo, sin embargo, es dependiente de las propiedades del suelo y las condiciones de las aguas subterráneas.

2.2.4 APLICACIONES DE LA CONGELACIÓN EN SUELOS EN LA INGENIERÍA CIVIL

Las principales aplicaciones de la congelación del suelo son proporcionar el apuntalamiento y control de las aguas subterráneas para facilitar la excavación, la construcción y otras actividades sobre terrenos con una alta capa freática (nivel hidrostático).

Esto elimina la necesidad de sistemas de apuntalamiento estructurales y de bombeo de agua. Esto también crea una superficie muy resistente, duradera para el equipo de construcción, aún en suelos incompetentes. “La congelación de suelo proporciona un apoyo fuerte y estable a las fundaciones cercanas a las excavaciones, tanto nuevas como existentes”. (Dan Mageau, 1998, Ingeniero Civil)

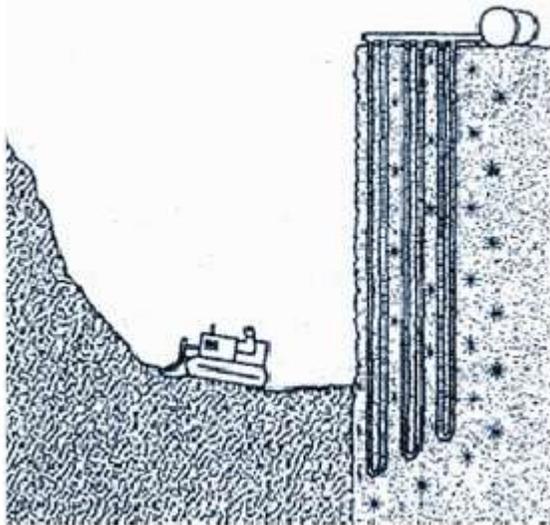


FIGURA: Representación gráfica del apuntalamiento congelado de un corte vertical de terreno, que permite el tránsito seguro de maquinaria y trabajadores en el fondo de la excavación.

2.2.4.1 Excavaciones Poco Profundas: Control de aguas subterráneas naturales a baja profundidad:

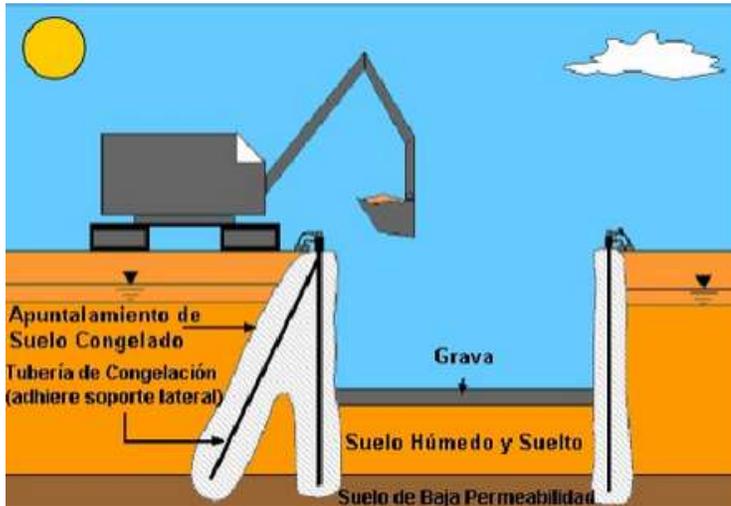


Figura 1: Esquema representativo control de aguas subterráneas naturales a baja profundidad.

- Detención del flujo de aguas subterráneas a lo largo de los lados y el fondo de las excavaciones para eliminar las faenas de bombeo.
- Proporciona apuntalamiento estable sin sistemas de contención internos o puntales.
- El suelo congelado permite el tráfico de maquinaria pesada a lo largo de la cima de la pared, sin que exista desmoronamientos o fallas de los costados de la excavación.
- El sello de hormigón del fondo de la excavación por lo general puede ser eliminado.
- Apropiado para excavaciones hasta aproximadamente 12 metros de profundidad.
- Costos comparables a los sistemas de apuntalamiento convencionales (estructuras de madera o metal).

2.2.4.2 Excavaciones Poco Profundas: Control de aguas subterráneas no naturales a baja profundidad. Terrenos Grandes



Figura2: Esquema representativo control de aguas subterráneas naturales a baja profundidad, terrenos grandes.

- Permite a excavaciones grandes y de poca profundidad ser logradas en condiciones secas sin bombear.
- Las tuberías de congelación son instaladas casi horizontalmente usando métodos de perforación direccionales.
- Sella completamente la excavación de aguas subterráneas.
- El sostenimiento del terreno es garantizado si se congela a una altura mayor que la profundidad de proyecto de la excavación.
- Se adapta a terrenos de tamaño y forma variable, con longitudes hasta de 300 metros.
- Puede ser usado también para cortar el flujo de aguas subterráneas bajo estructuras existentes.
- Rentable a profundidades de 18 metros o más.

2.2.4.3 Excavaciones Profundas: Control de aguas subterráneas naturales cerca del fondo de la excavación.

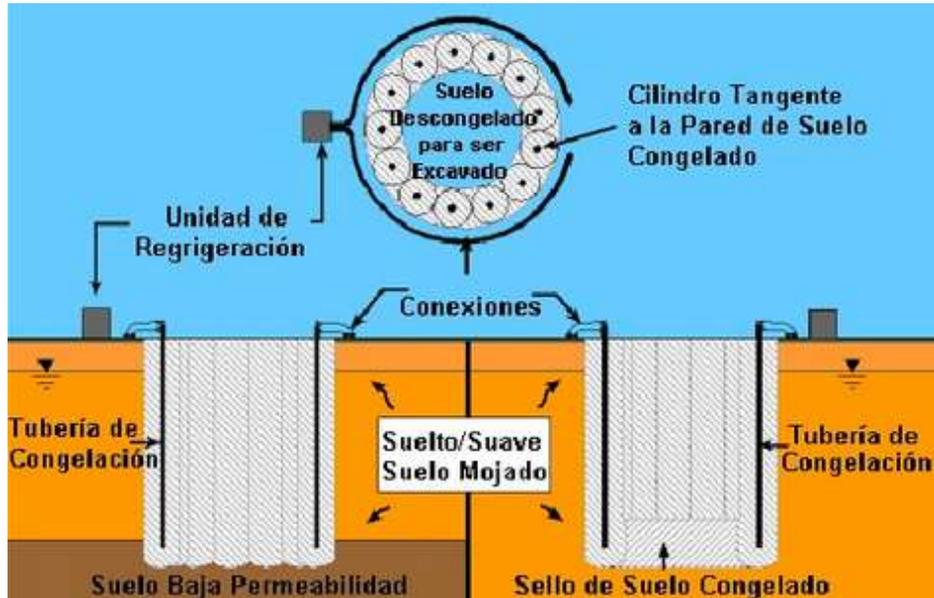


Figura3: Esquema representativo control de aguas subterráneas naturales cerca del fondo de la excavación

- La forma circular de la pared de suelo congelado proporciona un apuntalamiento muy fuerte sin necesidad de usar otro tipo de contención interna convencional.
- Este método ha sido usado sobre unos cientos de ejes por todo el mundo a profundidades de 240 metros.
- Corta completamente el flujo de aguas subterráneas, eliminando la necesidad de utilizar sistemas de bombeo.
- Un sello de suelo congelado puede ser creado en sitios donde ningún otro método de detención de flujos de aguas subterráneas naturales está presente.
- Puede ser usado en casi todos los tipos de suelo y condiciones de aguas subterráneas

2.2.4.4 CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES

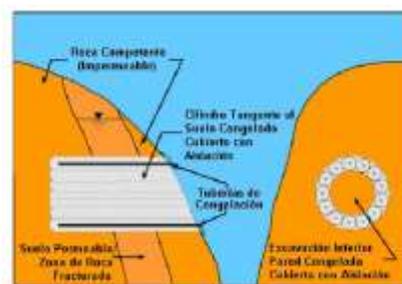


FIGURA 4: Esquema representativo construcción de túneles

- Proporciona estabilidad para permitir la construcción de túneles en suelos mojados, sueltos o con fallas.
- Eficaz para control de aguas subterráneas en excavación de túneles.
- El suelo/roca congelado puede ser usado como apuntalamiento alrededor del suelo descongelado o la masa completa de suelo/roca puede ser congelada.
- El apuntalamiento de suelo congelado también puede ser usado para estabilizar la tierra de los accesos y salidas de los túneles.

2.2.4.5 Pared de Detención del Flujo de Aguas Subterráneas

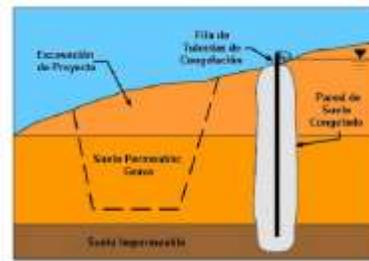


Figura 5. Esquema representativo pared de detención del flujo de aguas subterráneas

- Una pared de suelo congelado puede ser usada para impedir que aguas subterráneas entren en minas abiertas, hoyos de grava, terraplenes y otras instalaciones similares que son debajo de aguas subterráneas.
- Elimina o reduce enormemente la necesidad de bombear las napas subterráneas.
- También puede ser usado para detener la migración de aguas subterráneas contaminadas cerca de corrientes o lagos.

2.2.4.6 Apuntalamiento para Estructuras Existentes

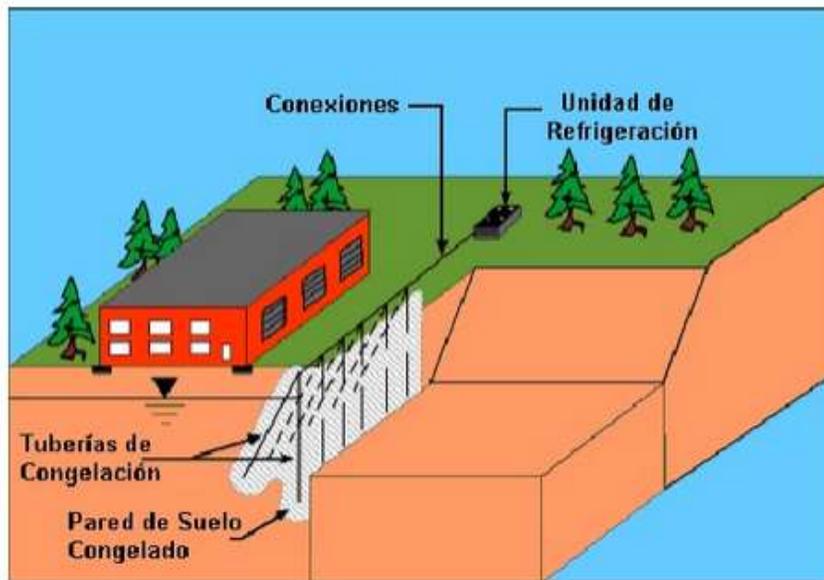


FIGURA 6: Esquema representativo de apuntalamiento para estructuras existentes

Previene el movimiento vertical y horizontal de estructuras adyacentes durante la excavación.

Eficaz en arena y grava mojada donde las fallas del terreno por ciclos de hielo – deshielo no es una preocupación.

Empleado para el proyecto del metro de Washington D.C. para proteger edificios históricos

2.2.4.7 Estabilización de Suelos con Baja Capacidad de Soporte



FIGURA 7: Esquema representativo de estabilización de suelos con baja capacidad de soporte.

- Es un método ambientalmente amistoso para estabilizar suelos muy poco resistentes, como es el caso de la turba, durante las faenas de construcción.
- Crea temporalmente vías de trabajo muy resistentes que permiten el tránsito de maquinaria y equipos de construcción muy pesados.
- Para instalar y fundar el sistema de congelación y el aislamiento, las excavaciones pueden ser realizadas a mano con mucha facilidad debido a la suavidad del terreno.
- Cuando el proyecto es completado, el sistema de congelación es quitado, permitiendo al suelo descongelarse gradualmente sin perder sus características iniciales

2.2.4.8 Estabilización de Terrenos con Fallas y Desmoronamientos

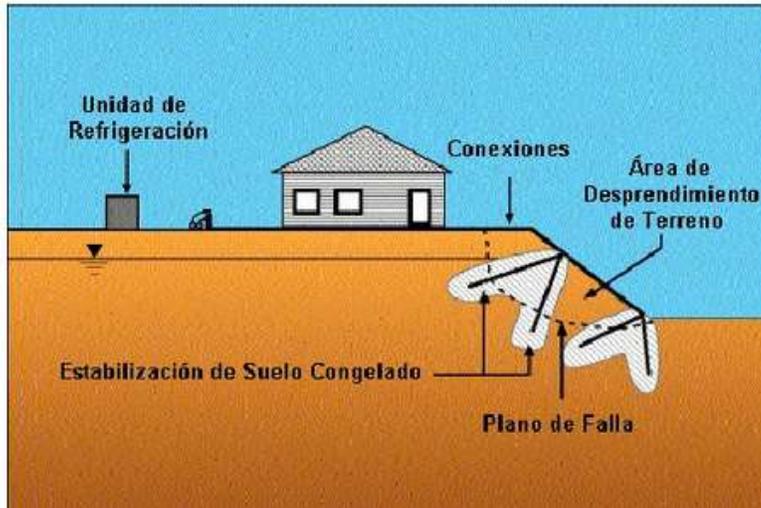


FIGURA 8 : Esquema representativo de estabilización de terrenos con fallas y desmoronamientos

- Estabiliza laderas con fallas creando zonas de refuerzo de suelo congelado.
- Puede ser usado como una estabilización temporal del terreno para permitir la movilización segura de equipos de construcción.
- También puede ser usado como una solución a largo plazo donde otros métodos no son factibles.

2.2.4.9 Mitigación de la Licuefacción y la Contaminación

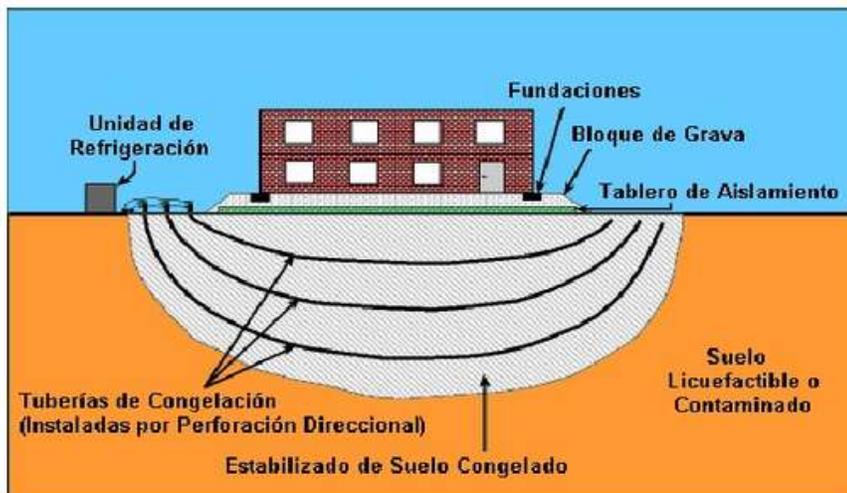


FIGURA 9: Esquema representativo de mitigación de licuefacción y contaminación

- Estabiliza la arena suelta y mojada de modo que no exista licuefacción durante un terremoto.
- Permite al empleo de fundaciones bajas, en vez de caras cimentaciones en pilotes, para una vida de diseño de 30 años.
- Donde la contaminación está presente, la congelación de suelo impide la migración de las partículas contaminantes indefinidamente.
- Los costos de mantenimiento son gastos de electricidad relativamente bajos.

2.2.5. PROYECTOS UTILIZADOS CON LA CONGELACIÓN DE SUELOS

A continuación se mostrará algunos proyectos aplicando el método:

2.2.5.1 Condominio en el Parque de Madison, cercano al Lago Washington

Este proyecto consistió en congelar el suelo para apuntalar la pared de una excavación de aproximadamente 3 metros de profundidad, el cual corresponde a la construcción de los subterráneos de un condominio localizado en el Parque de Madison, a sólo 2,5 metros del Lago Washington.



Figura 10: Suelo congelado de apuntalamiento de una excavación del subterráneo de un condominio en el Parque de Madiso

Este proyecto implicó una pared vertical de unos 13 metros de espesor de suelo congelado tanto para proporcionar el sostenimiento del terreno como para cortar la entrada de aguas subterráneas en la excavación.

2.2.5.2 Colector de Aguas Lluvias – Woodinville, Washington

- El objetivo de este proyecto fue proporcionar un ambiente seco para la construcción de estos 30 × 9 metros de superficie de colector, y poder así detener el flujo del agua subterránea de 9 metros de profundidad.
- La excavación de los primeros 6 metros de profundidad fue hecho en arena mojada, limo y turba localizada cerca de un riachuelo.
- Se congeló 1,2 metros de espesor de suelo, que sirvió de apuntalamiento de la pared alrededor de la excavación, cortando completamente el flujo de aguas subterráneas. Esto eliminó la necesidad de un costoso sello de hormigón y tener que bombear el agua.
- Un lado del apuntalamiento de suelo congelado soportó competentemente el tránsito de camiones tolva completamente cargados, sin movimientos laterales.
- El suelo congelado que apuntaló el terreno permitió que el contratista pudiera trabajar en un pozo seco durante los dos meses que la excavación estuvo abierta



figura 11: Descripción del lugar de trabajo estabilización



Figura 12: Excavación realizada en suelo congelado



Figura 13: Excavación casi completa

2.2.5.2 Apuntalamiento del Castillo Canterbury

- El suelo congelado fue usado para sostener una estructura histórica en Portland, en el área de las colinas del oeste de Oregón. Esta congelación se realizó mientras el terreno libre entre las colinas y una casa vecina fue estabilizada y una fundación para una nueva casa fue construida.
- El suelo está conformado por limos y arcillas, con tres planos de deslizamiento de terreno presentes en la parte inestable de la ladera; de los cuales, un desmoronamiento es antiguo y dos son recientes.
- Los deslizamientos de terreno recientes ocurrieron en febrero de 1996 y en noviembre de 1998, desmoronándose cientos de metros cúbicos de tierra, los cuales quedaron depositados en una calle de la ciudad, ubicada en la parte inferior de la ladera.
- Intentos anteriores de estabilizar el terreno libre de la ladera no tuvieron éxito.
- El terreno inestable puso en peligro la carretera de acceso a varias casas ubicadas bajo y sobre la ladera.



Figura 14: Sistema de apuntalamiento de suelo congelado instalado con dificultad sobre la ladera.

Reubicación del Alcantarillado de Los Ángeles



Figura 15: Vista superior del pozo congelado, con la exposición parcial de la pared

2.2.6. APLICABILIDAD EN NUESTRO MEDIO

Para la aplicabilidad en nuestro medio se deben cumplir aspectos fundamentales:

La rebaja de precios de Nitrógeno líquido y gases como el amoniaco que por el momento son incomparables en relación a otros países, esto se cambiará en los siguientes años gracias a la construcción de la primera planta de NIT, argón, oxígeno y amoniaco en Bolivia.

La especialización de las empresas que venden nitrógeno líquido y gases, para que brinden el servicio a la parte de la ingeniería civil ya que de momento en Bolivia solo se utiliza NIT para congelar alimentos, para la medicina, ganadería, ing. química.

En Bolivia las áreas propensas a deslizamientos se ubican a lo largo de la cordillera oriental y parte subandino, valles profundos (región de los Yungas), valles, que se extiende por los departamentos de La Paz, Oruro, Cochabamba, Potosí, Chuquisaca Tarija y Santa cruz.

En nuestro medio se realizan cada vez obras de mayor impacto, uno de los problemas más frecuentes y a tomar en cuenta son las obras construidas en el área urbana, ya que las mismas exponen a estructuras vecinas, La congelación se puede aplicar para las mismas como apuntalamientos que previenen los movimientos horizontal y vertical. Esto se produce prácticamente en todo el país, con más frecuencia en ciudades como La paz:

Al menos diez viviendas de la calle Munaypata, en la zona 14 de Septiembre (cerca de la Huyustus), se encuentran al filo de un vacío de unos diez metros de profundidad. Hace tres meses, el talud que estaba detrás de ellas fue cortado verticalmente para construir cuatro casas.



El presidente de la junta de vecinos de la zona, José Terrazas, denunció que dichas excavaciones ponen en riesgo la vida de los habitantes del sector y se teme eventuales deslizamientos debido a estas construcciones.

En Tarija también se presentan estos problemas en construcciones en el radio urbano, como también en ciudades como Yacuiba: Construcción mercado Yacuiba





Derrumbes que

Como ese caso se presenta muchos en el departamento de Tarija, también en excavaciones profundas de zapatas, pilotes, galerías.



Excavaciones peligrosas en nuestro medio

Como un ejemplo, en la construcción del mercado de Yacuiba para estabilizar el suelo evitando deslizamientos y a manera de proteger las estructuras vecinas.

Se vació pilotes a razón de 2 pilotes por metro lineal

El costo total por metro lineal excavación + hormigonado = 5562 bs/ml

Las profundidades de cada pilote fue de 10m, los pilotes fueron vaciados alrededor de la estructura pero aun así se observó deslizamientos y se tuvo que poner tablas para que trabajen en forma de empotramiento



Pilotes



Los pilotes resultan bastante caros considerando su precio por metro lineal, en este proyecto podría haberse utilizado la congelación de suelos alrededor de la estructura evitando el vaciado de pilotes ya que una vez terminada la obra los pilotes no cumplirán función en la

estructura y tampoco en las vecinas. Claro que para su aplicación se necesitarían hacer varios estudios previos.

Además de las excavaciones otra aplicación en Bolivia se podría dar en la construcción de Túneles, para solucionar problemas de estabilidad, filtraciones de venas acuíferas y seguridad al personal. Obviamente cada obra es muy particular, y se necesita estudios de cada obra como:

Estudios	Condiciones:
tipo de suelo de cada estrato	La congelación es aplicable en cualquier tipo de suelo
Características granulométricas	aplicable a cualquier granulometría en especial a finos que son los más débiles
Grado de Saturación	Aplicable desde grados de saturación en el rango 10-100%
Propiedad de conductividad térmica	Un parámetro que importante que va ligado con la energía necesaria para congelar el suelo estimaciones que se realizan a través de programas computarizados como frost 3d para determinaciones de tiempo de congelación, diámetros de tuberías, espaciado.etc
Análisis hidráulico	Para evaluar las velocidades de aguas subterráneas, para velocidades menores que 5 m/día no existen inconvenientes, para mayores se debe realizar un ajuste de diseño de espaciado de tuberías.
Resistencia a compresión	Un factor importante para determinar los rangos de temperatura a elevar de acuerdo a las resistencias que se pretenda llegar.

Lo primordial que se debe considerar es la seguridad de los obreros, a pesar en algunos casos no resulte tan rentable, en otros países priorizan condiciones de seguridad antes que de costos, de esta manera se evitara noticias como la siguiente en nuestro país:



El hecho que el día martes, identificado como Juan Carlos Ordóñez Morales (28), sufrió una lesión grave en la cabeza (severidad en revisión) y una fractura de la columna cervical en estado de la Pelu, Juan Carlos Ordóñez, fue parte del accidente ocurrido durante los trabajos de abastecimiento y también se menciona el momento de que los trabajadores se ocupan con las medidas de seguridad.

2.2.7 PELIGROS EN LAS EXCAVACIONES QUE SE PUEDEN EVITAR CON LA CONGELACIÓN:

Los peligros en excavaciones son comunes en los sitios de construcción. Los trabajadores **tienen más del doble de probabilidades de morir** que los trabajadores en cualquier otra clase de trabajo de construcción. Las excavaciones y las zanjas son por naturaleza inestable, y existen muchos tipos de peligros graves al hacerse este tipo de trabajo.

¿QUÉ PUEDE IR MAL EN UNA EXCAVACIÓN?

- Los derrumbes pueden ASFIXIAR O APLASTAR a los trabajadores.
- Las atmósferas peligrosas pueden PROVOCAR LA MUERTE O DEJAR LESIONADOS a los trabajadores:
- Los gases o vapores inflamables pueden causar INCENDIOS y EXPLOSIONES.
- Los gases o vapores tóxicos pueden PROVOCAR LA MUERTE O DEJAR GRAVEMENTE LESIONADOS a los trabajadores.
- Los trabajadores se pueden AHOGAR en agua, drenaje o en sustancias químicas si estos sistemas no han sido controlados, ya sea desviándolos hacia algún otro lado o apagándolos o clausurándolos para evitar que el trabajador quede expuesto a ellos.

2.3.- COSTOS REFERENCIALES APLICADOS EN OBRA

A continuación se muestran solo precios referenciales que muestren una idea de los costos aplicados en obra, ya que son muy variables de acuerdo al diámetro de tuberías, equipo de excavación, distancia entre tuberías.

Excavación:

PLANILLA DE PRECIOS UNITARIOS					
DATOS GENERALES:					
Proyecto:			Ítem:		1
Actividad:	Perforación				
Cantidad:	0,011				
Unidad:	m3				
Moneda:	Bs.				
1. MATERIALES					
N°	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO	COSTO
				PRODUCTIVO	TOTAL
					0,00
					0,00
TOTAL MATERIALES					0,00
2.MANO DE OBRA					

N°	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO	COSTO
				PRODUCTIVO	TOTAL
1	Albañil	Hra.	2,5	8	20
2	Ayudante	Hra.	5	12	60
3	Operador	Hra.	5	8,85	44,25
					0
SUBTOTAL MANO DE OBRA					124,25
Cargas Sociales = (% del subtotal de la mano de obra) (55% - 71.18%)				55	68,34
Impuestos IVA mano de obra = (% de Carga Social + Subtotal mano de obra)				14,94	28,77
TOTAL MANO DE OBRA					221,36
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					
N°	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO	COSTO
				PRODUCTIVO	TOTAL
1	Equipo de Perforación	Hra.	7,5	400	3000
					0
Herramientas =(% del total de mano de obra)				5	11,07
TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					3011,07

Precio de excavación de 1m lineal de tubería que congela de 1m3 de suelo= 33.1 bs (diámetro de 6") "variable"

Nitrógeno líquido

En primer lugar cabe destacar existen empresas que se dedican al exclusivo servicio de la congelación de suelos, ellos llevan hasta la zona donde se encuentra la obra el nitrógeno a través de cisternas, los precios de sus cisternas son muy variables de acuerdo a la capacidad y calidad.

Los precios están desde los 20000 \$us hasta los 50000\$ para capacidades de 15m3 de NIT.



El gasto principal en el método es el nitrógeno líquido ya que representa un 80 % del gasto total, el otro 20% se encuentran en la perforación de tuberías en el suelo, controles de temperatura y utilidades.

Se estima que para congelar 1m³ el suelo se necesita aproximadamente de 1500 a 2500lt de nitrógeno en la fase activa que dura de 4 a 7 días, y en la fase pasiva se necesitan alrededor de 90lt/día

El nitrógeno líquido en Bolivia tiene los siguientes precios:

Cochabamba	35bs/kg	29bs/lt
Santa Cruz	25bs/kg	21 bs/lt
Argentina		4 bs/lt
EEUU	0,1 - 0,15 \$us/lt	0,7 - 1bs/lt
Tarija	40bs/kg	33bs/lt

FASE ACTIVA:

El precio referencial de la congelación de 1m³ de suelo es:

Lugar:	Precio bs/lt	Cantidad 1 (lt)	Cantidad 2 (lt)	Precio1 bs/m ³	Precio2 bs/m ³
Cochabamba	29	1500	2500	43500	72500
Santa Cruz	21	1500	2500	31500	52500
Argentina	4	1500	2500	600	10000
EEUU	1	1500	2500	1500	2500
Tarija	33	1500	2500	49500	82500

Como se observa en Bolivia los precios para la congelación de suelos a través del nitrógeno líquido son nada rentables, en especial en la fase activa donde se encuentra el mayor gasto de nitrógeno líquido, a esto aún se suma el 20% de gastos adicionales y utilidad, esto explica que hasta el momento no se haya aplicado en la diversidad de proyectos en el campo de la ingeniería en Bolivia.

FASE PASIVA:

En la fase pasiva se reduce drásticamente el consumo de nitrógeno ya que solo se debe mantener el suelo congelado, la cantidad aproximada para la mantención es de 90lt/día por cada metro cúbico de suelo:

Lugar:	Precio bs/lt	Cantidad lt	Precio bs/m3
Cochabamba	29	90	2610
Santa Cruz	21	90	1890
Argentina	4	90	360
EEUU	1	90	90
Tarija	33	90	2970

A pesar de la reducción drástica de precios en esta fase, sigue siendo nada rentable en nuestro país por ahora, pero esto cambiará en los próximos años gracias a la construcción de la primera planta de nitrógeno en Bolivia por Industrializadora de aire líquido SA (INALSA), se estima que los precios de nitrógeno se venderán en mercado aproximadamente a 1,5 bs el litro, por lo que la congelación de suelos se verá ampliamente favorecida y haciéndola más rentable en nuestro medio:

Precios Estimados Bolivia Fase activa:

Lugar:	Precio bs/lt	Cantidad 1	Cantidad 2	Precio1 bs/m3	Precio2 bs/m3
BOLIVIA	1,5	1500	2500	2250	3750

CONGELACIÓN DE 1M3 = 3750 bs

Precio de excavación de un metro lineal de tubería que congela 1m3 de suelo: 33.1 bs (dentro de los 20% incluidos gastos generales)

Fase pasiva

Lugar:	Precio bs/lt	Cantidad lt/dia	Precio bs/m3
BOLIVIA	1,5	90	135

CONGELACIÓN DE 1M3: 135 bs /dia

Precio de excavación para 1m3 de suelo congelado: 33.1 bs (dentro de los 20% incluidos gastos generales)

Congelación del Suelo Mediante Salmuera:

El método mediante salmuera resulta más económico en ciertos casos, como por ejemplo cuando se necesite mantener el suelo congelado durante más tiempo que pueden extenderse de 4 a 5 meses, en casos como esos el nitrógeno líquido no resulta factible al contrario que el método de la salmuera donde el consumo es eléctrico ya que el amoniaco circula por un circuito cerrado, y no es dirigido hacia la atmósfera. Se estima que se debe cambiar de gas y hacer mantenimiento una vez al año por lo que no se cobra precios de amoniaco, los precios que se pagan son en un gran porcentaje por el consumo de energía eléctrica.

Los equipos Frigoríficos tienen precios muy variables, se encuentran desde 40000 \$us hasta 80000 \$us. de acuerdo a su marca, modelo, potencia y a esto se suman los precios de las tuberías, de acuerdo al tipo de servicio que brindan deben tener las longitudes adecuadas.

Consumo de energía referencial de equipos frigoríficos:

El consumo de energía estimado es de 0.05 – 0.1 \$us/hora para mantener congelado 1m³ de suelo que representa aproximadamente un 60% del gasto general.

Por lo que los costos para mantener 1m³ de suelo diariamente varían entre: 8.4 – 16.8 bs/día.

Precio de excavación de 1m lineal de tubería que congela de 1m³ de suelo=: 33.1 bs (dentro de los 40% incluidos gastos generales)

Como se observa existe una diferencia significativa entre los dos métodos:

Si se compara los gastos para mantener 1m³ de congelado el suelo:

Con NIT

Precio bs/lit	Cantidad lit/día	Precio bs/día
1,5	90	135

Con Salmuera:

0.05-0.1 \$us/hora	Precio bs/día
0.05-0.1	8.4 - 16.8

Notablemente el método de salmuera parecería más rentable, pero hay que tomar en cuenta la característica de cada proyecto, como la duración, las velocidades de corrientes, lo que lo

hace más factible al nitrógeno líquido, cada proyecto es único por lo que en ocasiones se deciden formar un sistema mixto: NIT para la fase activa y salmuera para la fase pasiva. También hay que recalcar que existe un costo que es variable y que se encuentra entre el 20-25% para NIT y 40% para salmuera donde se incluyen los costos instalación, utilidades, perforaciones.

“Los precios mostrados son netamente referenciales, ninguna empresa da precios aproximados ya que es muy variable para cada caso de proyecto, se lo hizo en el presente estudio solo como referencia”

2.4.- MARCO CONCEPTUAL

Resistencia a compresión: Es Esfuerzo máximo que puede soportar un material bajo una carga de aplastamiento.

Arcillas: Las arcillas son cualquier sedimento o depósito mineral que es plástico cuando se humedece y que consiste de un material granuloso muy fino

Arenas: La arena es un conjunto de partículas de rocas disgregadas.

Nitrógeno líquido: El nitrógeno líquido es nitrógeno puro en estado líquido a una temperatura igual o menor a su temperatura de ebullición, que es de $-195,8\text{ }^{\circ}\text{C}$

La salmuera: Es agua con una alta concentración de sal (NaCl) disuelta

Hermético: Que se cierra de modo que no permite pasar el aire ni los fluidos

2.5.-NORMATIVO

Todos los ensayos que se realizarán en el Laboratorio son desarrollados siguiendo los Lineamientos establecidos en las normas técnicas internacionales ASTM y AASHTO. Siguiendo las recomendaciones técnicas establecidas en los manuales técnicos de la Administradora Boliviana de Carreteras

“Con la información percibida por el investigador, se asume la posición de que los suelos congelados aumentan su resistencia en forma ascendente en función de temperaturas decrecientes, la incertidumbre es: ¿Cuánto? ¿Qué comportamiento de deformación tendrá? ¿Qué tipo de fallas se presentarán cuando sus valores de resistencia máxima sean sobrepasados?”

CAPÍTULO III RELEVAMIENTO DE INFORMACIÓN

3.1.- IDENTIFICACIÓN DE MUESTRAS

ARCILLA DE LA QUEBRADA EL MONTE (ZONA LOURDES): BANCO 1

ARCILLA DE LA ZONA PARADA EL NORTE: BANCO 2

ARENA DE LA QUEBRADA EL MONTE (ZONA LOURDES): BANCO 3

ARENA DE LA ZONA LA PINTADA: (BANCO 4)

3.2.- EXTRACCIÓN DE MUESTRAS:

Se procedió a la extracción de muestras de los cuatro bancos siguiendo los criterios de relevamiento mencionados en el capítulo I:

EXTRACCION DE SUELOS QUEBRADA EL MONTE:



Luego de realizar varias exploraciones se extrajo el material, retirando la primera capa expuesta a la intemperie obteniendo a más profundidad un material homogéneo.

La cantidad de material extraído fue de 150 kg.

EXTRACCION DE SUELOS ZONA PARADA EL NORTE:



De la misma manera se retiró la primera capa, encontrando un material homogéneo a 1m de profundidad.

La cantidad de material extraído fue de 150 kg

EXTRACCION DE ARENAS ZONA LA PINTADA Y QUEBRADA EL MONTE

Para la extracción de las arenas se tuvo que buscar lugares estratégicos, donde no se vean afectados por la llegada del rio y quebrada, por lo que las muestras se extrajeron de las orillas:



Quebrada el monte



La pintada

Cantidad de material extraído para cada banco de las arenas fue de 70kg.

3.3 UBICACIÓN DE BANCOS

BANCO 1 (ZONA QUEBRADA EL MONTE)

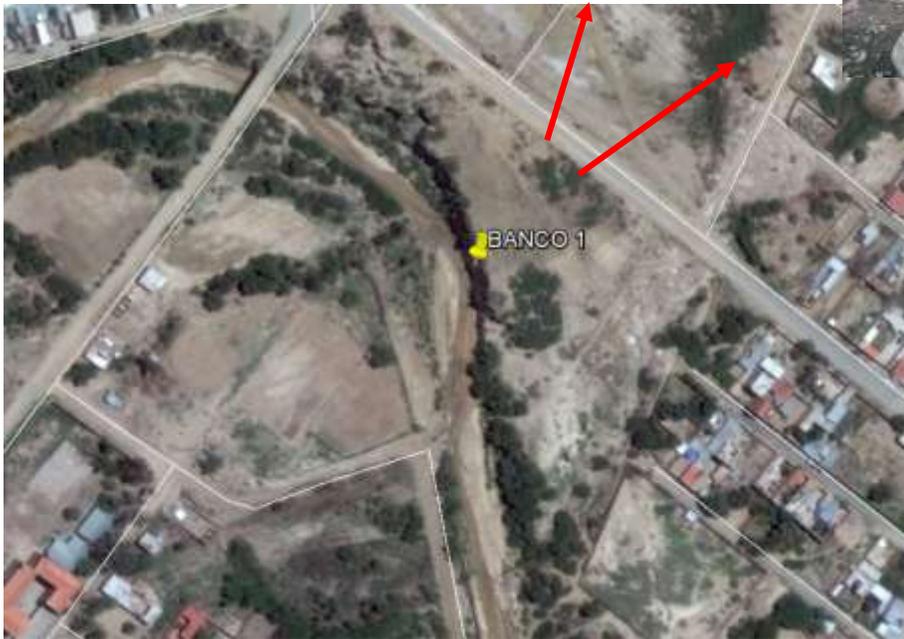


Imagen satelital

Coordenadas:

Nombre:	BANCO 1
Latitud:	21°30'57.99"S
Longitud:	64°43'9.15"O

BANCO 2 (ZONA PARADA EL NORTE)



Imagen satelital

Coordenadas:

Nombre:	<input type="text" value="BANCO 2"/>
Latitud:	<input type="text" value="21°30'9.89\"/>
Longitud:	<input type="text" value="64°45'11.35\"/>

BANCO 3 (ZONA QUEBRADA EL MONTE)



COORDENADAS:

Nombre:	BANCO 3
Latitud:	21°30'57.76"S
Longitud:	64°43'10.48"O

BANCO 4 (ZONA LA PINTADA)



IMAGEN SATELITAL

COORDENADAS:

Nombre:	<input type="text" value="BANCO 4"/>
Latitud:	<input type="text" value="21°36'20.75\"/>
Longitud:	<input type="text" value="64°38'25.73\"/>

3.4 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

3.4.1 TABLAS RESUMEN

CARACTERIZACIÓN														
TABLA RESUMEN ARCILLAS														
Suelos Arcillosos:	Identificación	% humedad	LL	LP	IP	% ret 4	% ret 40	% ret 200	Pasa 200	% arcillas	clasf Aastho	SUCS	C.H.O	Dmax
QUEBRADA EL MONTE	Banco 1	18,59	29,21	16,43	13	0	0,6	7,71	92,29	13,6	A-6 (14)	CL	13,8	1,75
PARADA DEL NORTE	Banco 2	5,21	32,63	22	11	0	0,73	3,21	96,79	20,2	A-6(13)	CL	14,43	1,79

SUELOS ARCILLOSOS	Identificación	CBR		EXPANSIONES		
		100%	95%	12 GOLPES	25 GOLPES	56 GOLPES
QUEBRADA EL MONTE	Banco 1	6	5	2,38	2,13	1,9
PARADA DEL NORTE	Banco 2	6	5	2,31	2,23	1,82

TABLAS RESUMEN ARENAS										
		% humedad	% ret 4	% ret 10	% ret 40	% ret 200	Pasa 200	Peso esp.	% de absorci	coef permea
QUEBRADA EL MONTE	Banco 3	6,46	1,03	1,51	18,2	77,22	2,04	2,67	1,42	0,000474
LA PINTADA	Banco 4	5,21	0	0,09	4,08	95,08	4,92	2,64	2,06	0,00058

TABLA 1 Caracterización de materiales

A-6 Este tipo de suelo es un suelo arcillosos plástico, que normalmente tiene un 75% o más de material que pasa por el tamiz nº 200.

A-3 Corresponde, típicamente, a suelos constituidos por arena fina

CAPITULO IV INCIDENCIA DE LA CONGELACIÓN EN LA RESISTENCIA DE LOS SUELOS EN ESTUDIO

4.1 DISEÑOS DE ESPECIMENES DE PRUEBA:

4.1.1 SUELOS ARCILLOSOS

4.1.1.1 Preparación de probetas

Para la realización de los especímenes se utilizó el equipo de compactación proctor T-99 Compactando en primera instancia 3 capas de 25 golpes, a causa de la irregularidad de los equipos a causa del mal uso se utilizó hojas papel bond con aceite de motor para su extracción y para proteger la muestra:



- Se preparó el suelo a humedad óptima para su elaboración:



- La extracción de la muestra se la realizó con el extractor teniendo en cuenta la alineación vertical del equipo:



Las Muestras fueron identificadas, medidas y pesadas:



control de peso



Control de dimensiones



Probetas banco 1



Probetas banco 2



4.1.1.2 Saturación

Para la saturación se tuvieron primeramente inconvenientes, ya que las muestras expuestas directamente a la saturación se desarmaban, por tal motivo se procedió a sellarlas con papel y cinta aislante a los costados dejando libre a través de papel filtro en la parte inferior y superior de cada espécimen:



PREPARACIÓN PARA SATURAR



Saturación

Se realizaron cortes a probetas de prueba realizando una exploración visual de la saturación al centro de las mismas a 24,48 y 72 horas de saturación para definir un tiempo estándar.



4.1.1.3 Congelación

Las probetas luego de ser saturadas fueron despojadas controlando sus dimensiones actuales y ser inmediatamente trasladadas a una congeladora estándar para su pre congelación durante 3 horas para mantener su perfecta forma y poder ser trasladadas a la cámara de congelación sin sufrir daños:



Probeta saturada



pre congelación



Congelación en cámara

4.1.1.4 Rotura de Probetas:

Las probetas fueron trasladadas al laboratorio de suelos de la U.A.J.M.S en la temperatura deseada en conservadoras para su inmediata rotura.



Control de dimensiones y peso

La rotura de las probetas se lo realizó con el anillo dinamométrico de 2000 lb controlando la deformación de la probeta y del anillo para su posterior determinación de la carga a través de su ecuación de calibración.

Las probetas fueron protegidas mediante bolsas de plástico para evitar la filtración de agua hacia el equipo:



Probeta congelada en anillo dinamométrico de 2000lb

Para fines de caracterización se rompió probetas sin congelar obteniendo los esfuerzos a compresión.



4.1.1.5 CALIBRACIÓN DE ANILLOS DINAMOMÉTRICOS (2000 lb)

CALIBRACIÓN DE ANILLOS DINAMOMÉTRICOS

Capacidad:	2000 Lb
Esfuerzo:	Compresión
Fecha:	20 de Octubre de 2008
Código Anillo	SN 215

ANILLO (2000 Lb)		
x = Carga (KN)	x = Carga (Kgf)	y = Deformación Anillo (mm)
1,5	152,96	0,414
3	305,92	0,855
6	611,83	1,692
9	917,75	2,569
12	1223,66	3,449
15	1529,58	4,356
18	1835,50	5,263
21	2141,41	6,185
24	2447,33	7,130
27	2753,24	8,088
30	3059,16	9,134



4.1.2 SUELOS ARENOSOS

4.1.2.1 Preparación de moldes

Los moldes para las arenas fueron construidas de madera con pernos para su respectivo desmontaje para extracción de muestras:

Dimensiones:

a= 8cm b= 8cm c=12cm

Área= 64cm²

Volumen= 768cm³



Moldes para arenas

4.1.2.2 Saturación

Las arenas se saturaron durante 25 horas, luego fueron colocadas en los moldes:



Arenas saturadas en moldes

4.1.2.3 Pre congelación

Los moldes se trasladaron a una heladera estándar durante 2 horas de manera que las probetas ganen un grado de rigidez que permita extraerlos con facilidad y mantengan su forma:



Probetas en congelador estándar

4.1.2.4 Congelación

Luego de ser extraídas las muestras se trasladaron a la cámara de congelación:



Probetas en cámara

4.1.2.5 Rotura de Probetas:

Una vez trasladadas las probetas al laboratorio se procedió a su rotura, sin embargo en los días de pruebas se constató que éstas ganan mucha más resistencia que las arcillosas, por lo que se utilizó un anillo de mayor capacidad; el anillo dinamométrico de 5000kg.



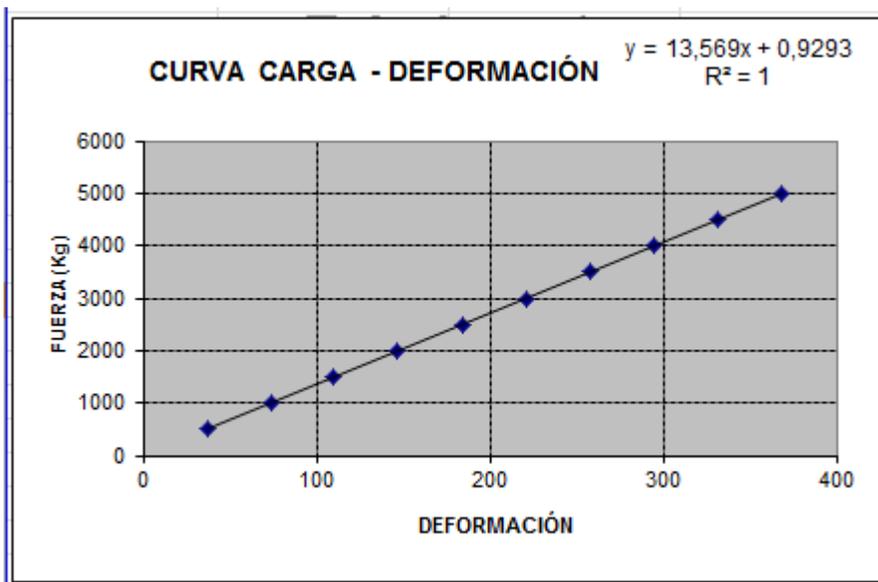
Control de peso dimensiones y temperatura



Probeta en anillo dinamométrico de 5000kg

4.1.2.6 CALIBRACIÓN DE ANILLOS DINAMOMÉTRICOS (5000kg)

CALIBRACIÓN DE ANILLOS DINAMOMÉTRICOS	
Capacidad:	5000 Kg
Esfuerzo:	Compresión
Fecha:	20 de Octubre de 2008
ANILLO 1 (5000 Kg)	
Y = Fuerza (Kg)	X = Deformación
500	37
1000	74
1500	110
2000	147
2500	184
3000	221
3500	258
4000	295
4500	332
5000	368



4.2 EXPRESIONES, COMPORTAMIENTO Y ANÁLISIS:

4.2.1 PRUEBAS DE RESISTENCIA PROBETAS ARCILLOSAS A HUMEDAD ÓPTIMA (SIN CONGELAR)

4.2.1.1 FALLAS



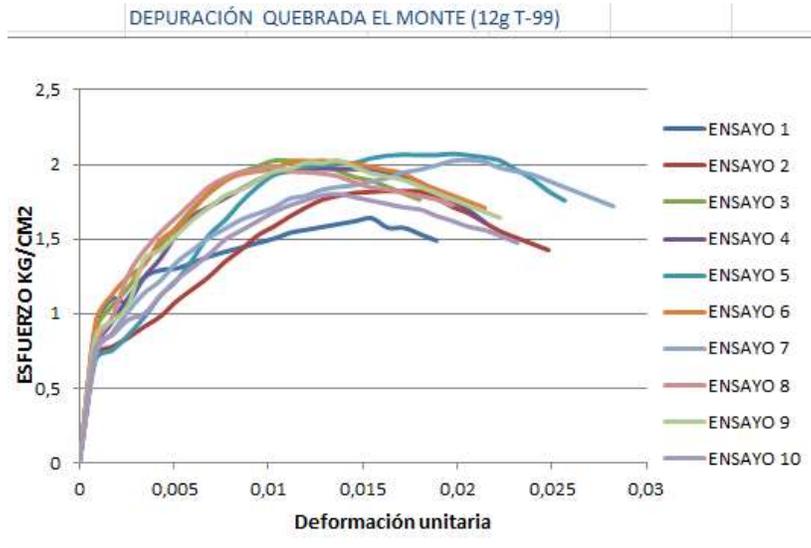
Algunas probetas del ensayo banco 1 y 2

La mayoría de las probetas tuvieron la misma falla, como puede verse claramente que la falla se presenta principalmente en forma de grietas verticales, que de acuerdo a la teoría de Griffith acusan una falla frágil del suelo, producto de la concentración de tensiones en las fisuras del material sobre planos paralelos a la dirección de la compresión. Esto podría explicar en parte las altas resistencias alcanzadas por el suelo con bajísimas deformaciones, y la caída brusca de la resistencia después del ensayo.

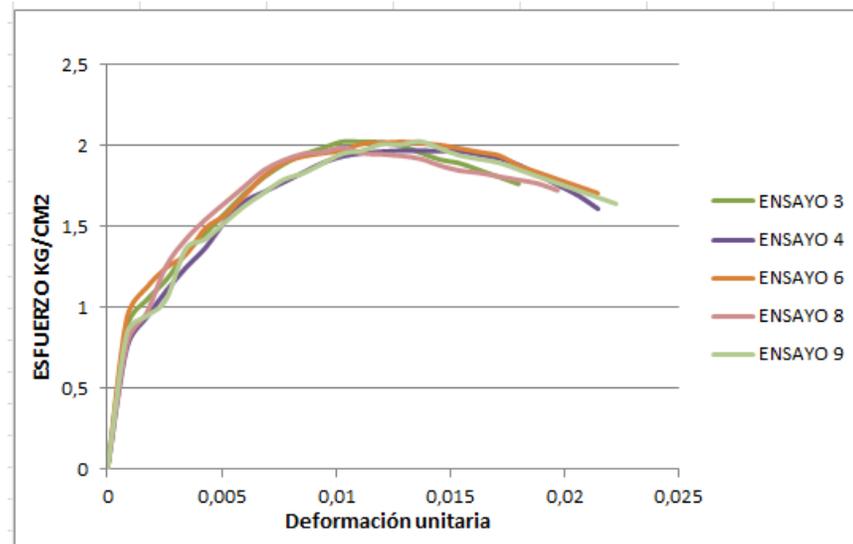
4.2.1.2 DEPURACIÓN DE PROBETAS:

Se procedió con los criterios de depuración, observando que cada probeta varía tanto su comportamiento como su resistencia, por lo que se tuvo que aumentar el número de probetas: a continuación se presentan las gráficas resumen de depuración:

Banco 1



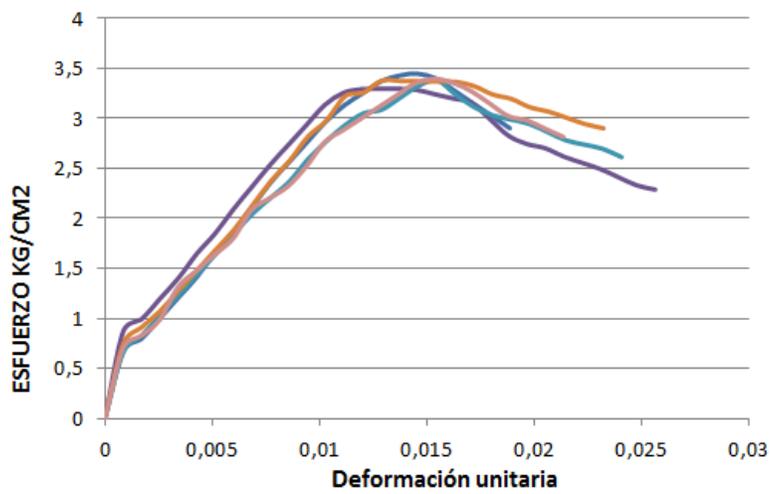
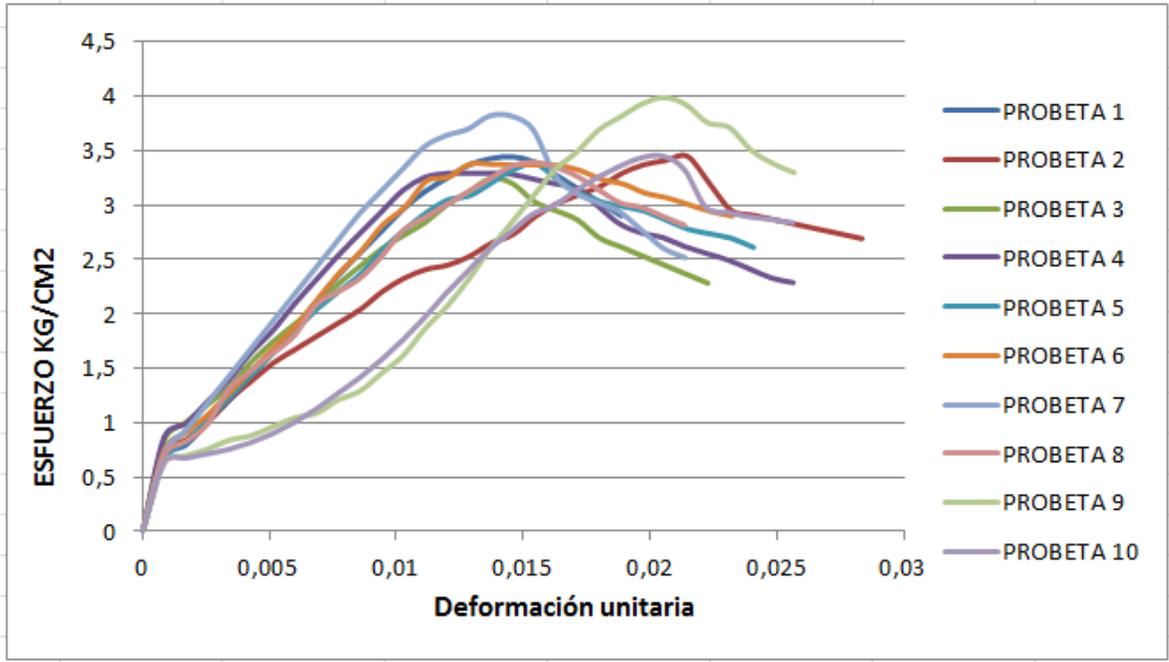
Probetas válidas



ESFUERZO PROMEDIO:	2,003 kg/cm ²
Deform unit smax	0,012
Esf. Cortante	1,001

Probetas válidas

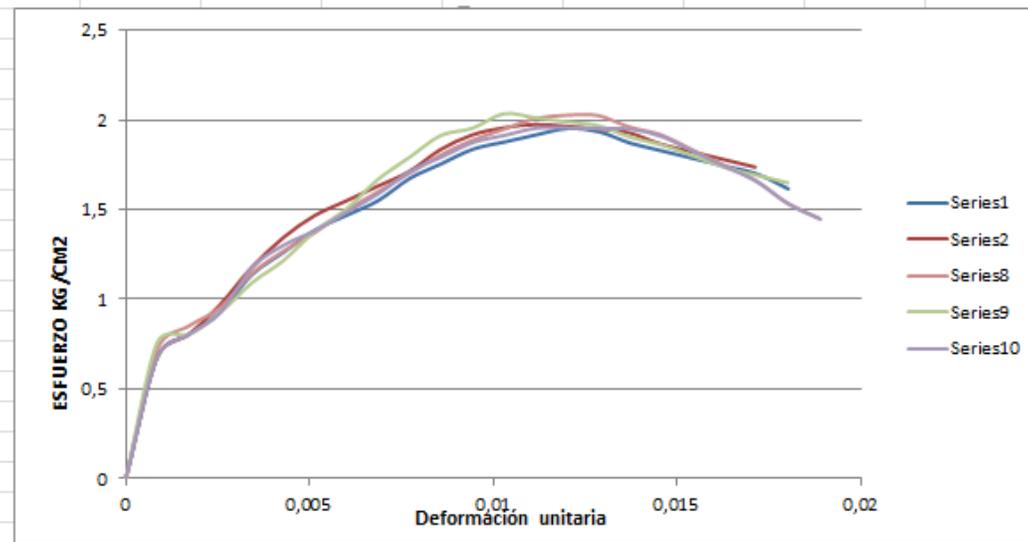
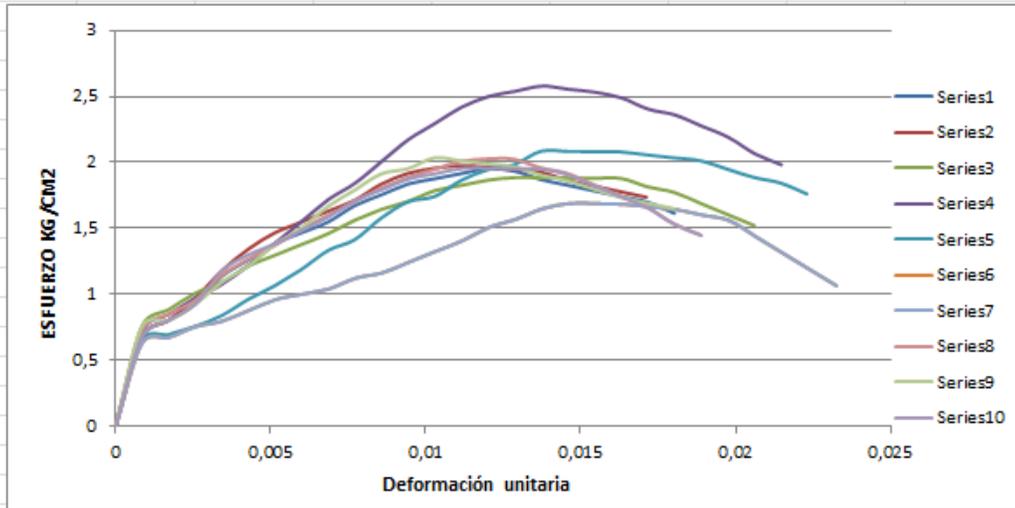
QUEBRADA EL MONTE 25g T-99



ESFUERZO PROMEDIO:	3,38 kg/cm2
Deform unit smax	0,01
Cohesión	1,69

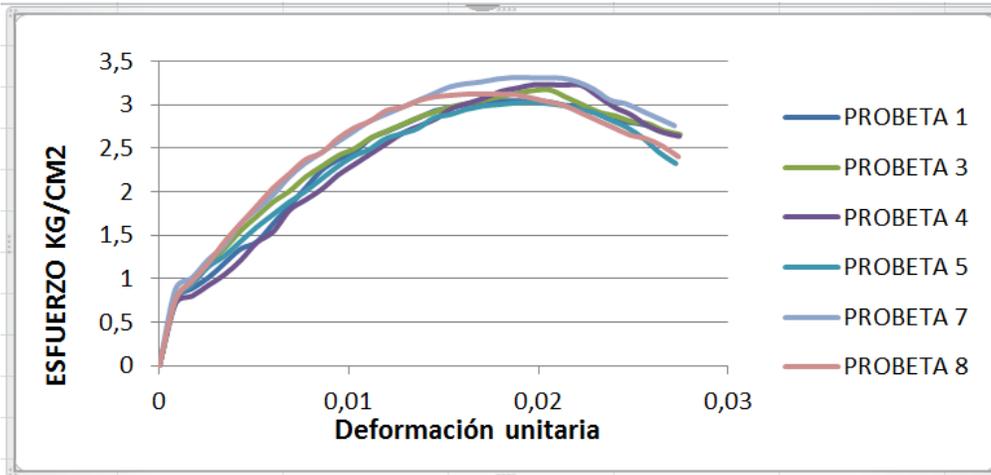
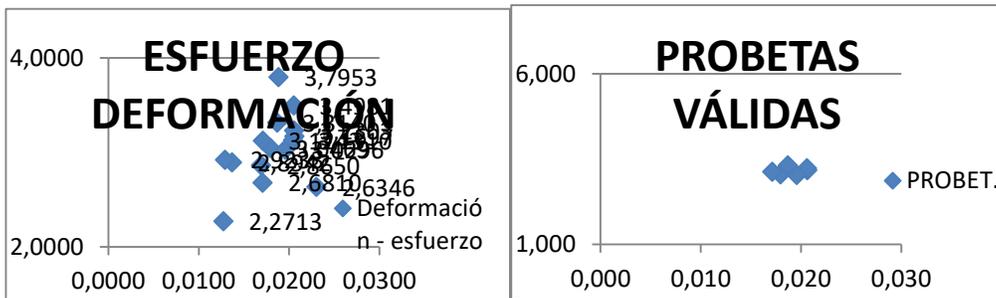
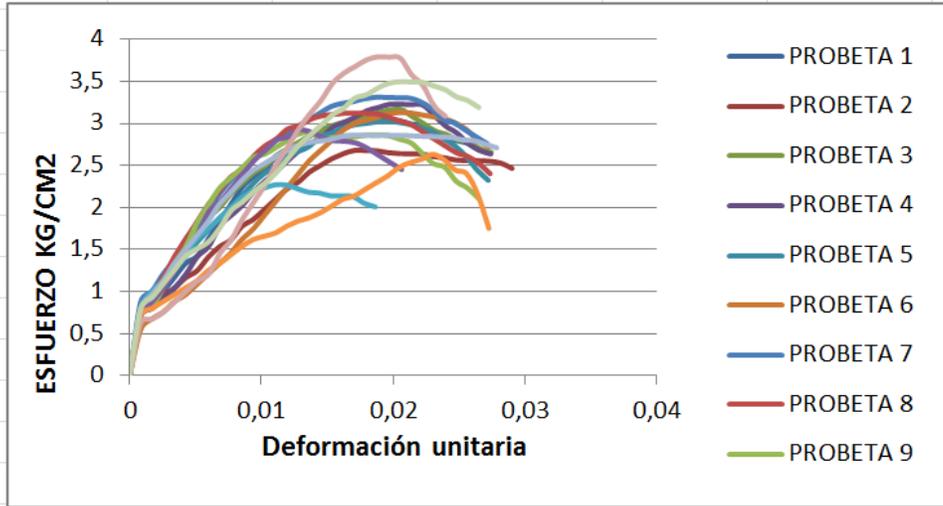
Banco 2

PARADA DEL NORTE 12g T-99



ESFUERZO PROMEDIO:	1,99 kg/cm2
Deform unit smax	0,01
Esf cortante	0,99

Parada del norte 25g



ESFUERZO PROMEDIO:	3,152 kg/cm2
Deform unit smax	0,0191
Esf cortante	1,5762

Tabla resumen 2 Compresión de arcillas sin congelar:

Identificación	Golpes/ capa	Deformación unitaria	Esfuerzo compresión (kg/cm ²)	Esfuerzo Cortante (kg/cm ²)
Banco 1	12	0,012	2,003	1,00
	25	0,0144	3.38	1,75
Banco 2	12	0,0113	1,989	0,99
	25	0,0191	3,1525	1,58

Se observa claramente que la resistencia bajó notablemente para una energía de compactación de 12 golpes en cada banco.

La consistencia del suelo para una densidad máxima se encuentra en la clasificación muy firme, y para 12 golpes como firme según la clasificación de Terzaghi y peck, 1955.

(Terzaghi y Peck, 1955).

Consistencia del suelo	Carga última (kg/cm ²)
Muy blanda	<0,25
Blanda	0,25-0,50
Media	0,50-1,00
Firme	1,00-2,00
Muy firme	2,00-4,00
Dura	>4,00

4.2.2 PRUEBAS DE RESISTENCIA PROBETAS ARCILLOSAS CONGELADAS

4.2.2.1 Fallas en pruebas de resistencia

En las pruebas de resistencia en las probetas congeladas tanto para los dos bancos en estudio, se observó que la falla producida es totalmente diferente a las que se rompieron anteriormente, sin embargo el comportamiento de deformación presentado fue similar en cada temperatura estudiada, lo que si se observó es el aumento de resistencia como se plasmará más adelante:



Vista lateral de fallas encontradas



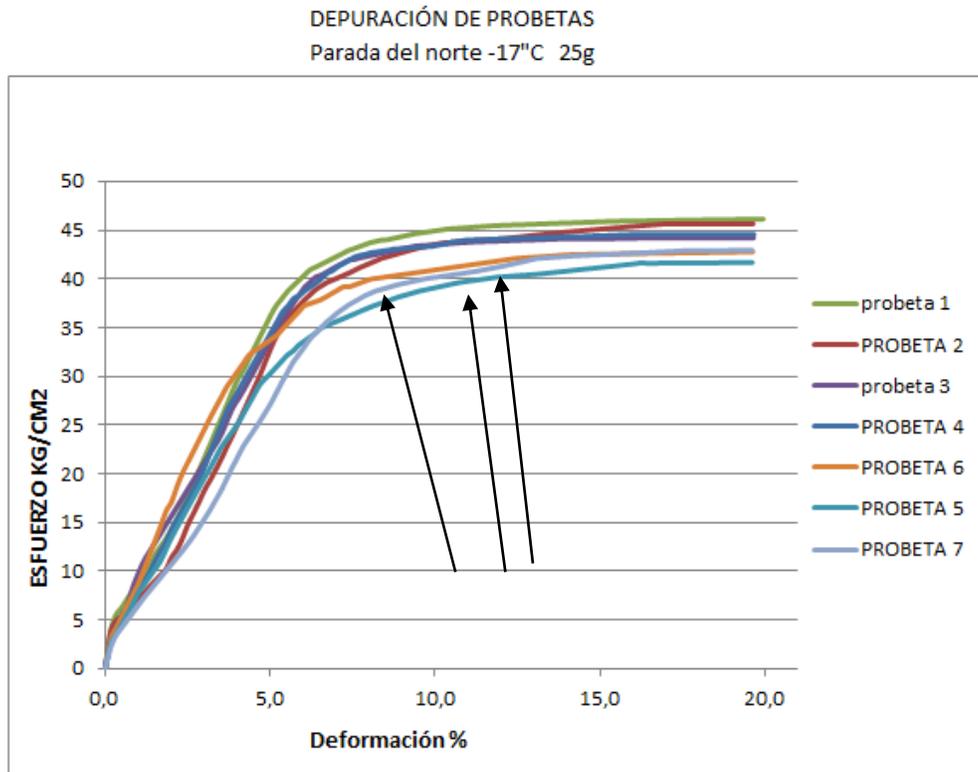
Vista en planta de fallas

Claramente se observa que la falla se presenta por acción de descongelación en la parte superior e inferior de las probetas, por lo que no se presenta alteración de la parte central de las probetas, debido a esto no se da la caída de resistencia, cuando pasa esto se toma el valor de resistencia máximo al 20% de deformación como se verá más adelante.

(Cada probeta junto a su deformación, resistencia y su falla se encuentran en las planillas anexos)

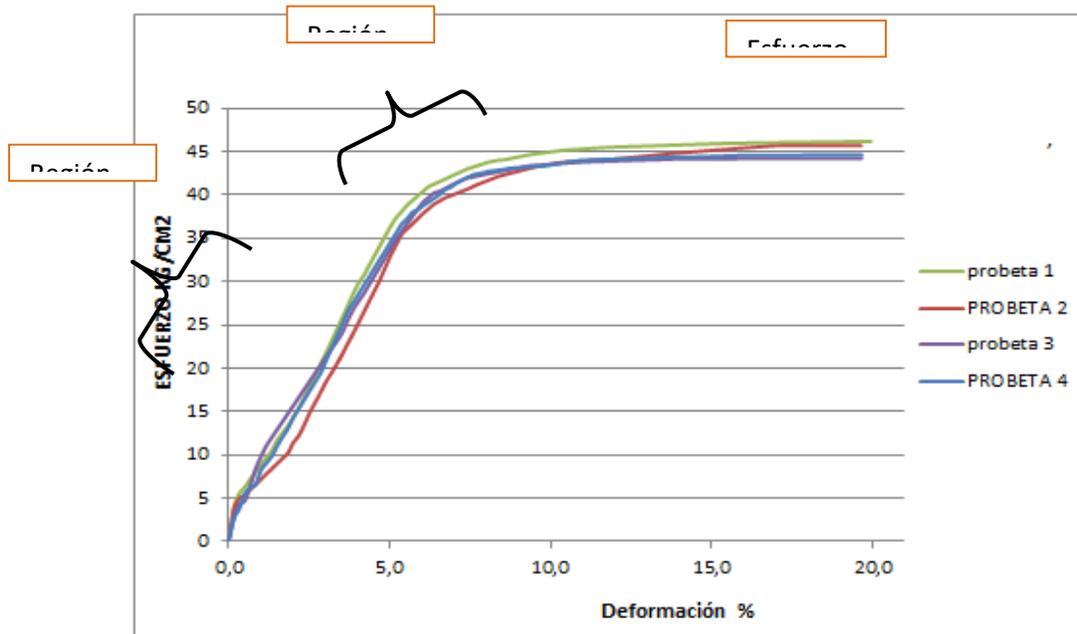
4.2.2.2 DEPURACIÓN DE PROBETAS

La depuración de probetas se la realizó para las 16 gráficas resumen que serán mostradas en anexos, el comportamiento que se presentó en la mayoría de las probetas fue el siguiente:



Probetas

Una de las posibles causas de que las probetas tengan un comportamiento diferente, es que se hayan cometido errores en la compactación, que las probetas hayan sido dañadas al ser trasladadas, o extraídas de su molde con el extractor.



PROBETAS VÁLIDAS 1,2,3,4

ESFUERZO PROMEDIO:	45,145	kg/cm2
Deform unit smax	20	
Esfuerzo cortante	22,573	kg/cm2

“En total para los suelos arcillosos se realizó 16 gráficas de depuración que resultan del comportamiento de un total de 112 probetas congeladas” Todas estas en anexos.

4.2.2.3 Densidad Volumen y Grado de saturación

Mediante relaciones volumétricas se obtuvo el grado de saturación, cambio volumétrico y grado de saturación que se midió en las 112 probetas congeladas:

A continuación se muestra la tabla resumen:

Tabla resumen 3 densidad - saturación banco 1

BANCO 1			
3 capas 12 golpes T99		3 capas 25 golpes T-99	
Densidad 1 (g/cm3)	1,441	Densidad 2 (g/cm3):	1,729
Grado de saturación %	<u>94,102</u>	Grado de saturación %	<u>88,186</u>

Tabla resumen 4 densidad - saturación banco 2

BANCO 2

3 capas 12 golpes T99

Densidad 1 (g/cm³) 1,511

Grado de saturación % 90,096

3 capas 25 golpes T-99

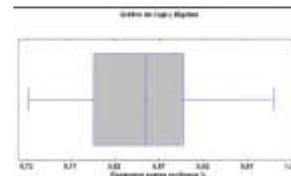
Densidad 2 (g/cm³): 1,765

Grado de saturación % 85,616

% Expansión suelos arcillosos congelados				
0,776	0,746	0,822	0,934	0,864
0,804	0,912	0,867	0,98	0,827
0,814	0,917	0,725	0,827	0,857
0,782	0,754	0,892	0,994	0,959
0,725	0,817	0,897	0,999	0,796
0,793	1,00	0,733	0,835	0,847
0,756	0,746	0,796	0,827	0,969
0,786	0,774	0,98	0,918	0,864
0,888	0,783	0,857	0,888	1,00
0,725	0,741	0,888	0,878	0,894
0,776	0,746	0,99	0,939	0,908
0,959	0,847	0,827	0,98	0,895
0,898	0,725	0,878	0,888	0,815
0,824	0,908	0,99	0,861	0,883
0,959	0,847	0,929	0,864	0,929
0,853	0,773	0,824	0,806	0,776
0,867	0,908	0,865	0,835	0,943
0,854	0,802	0,884	0,885	0,948
0,774	0,817	0,867	0,853	0,784
0,842	0,803	0,885	0,796	0,847
0,888	0,723	0,865	0,776	

Resumen Estadístico para Expansión suelos arcillosos %

Recuento	104
Promedio	0,854133
Desviación Estándar	0,0728923
Coefficiente de Variación	8,65374%
Mínimo	0,725
Máximo	1,0
Rango	0,277
Suma	88,8599
Cuarta Estadística	1,0



Cambio volumétrico= 0.85%

El grado de saturación en ambos bancos se obtuvo ligeramente menor para una densidad mayor, lo que resulta positivo en suelos no muy compactos en el caso cuando se aplica la saturación artificial de terrenos para su estabilización.

Sobre los cambios volumétricos, se constata que fueron aproximadamente del 1% lo que no resulta un inconveniente, claramente se observa que ninguna probeta resultó fragmentada o

fisurada despues de la congelación, por lo que en la obra dificilmente se presentará al momento de la congelación.

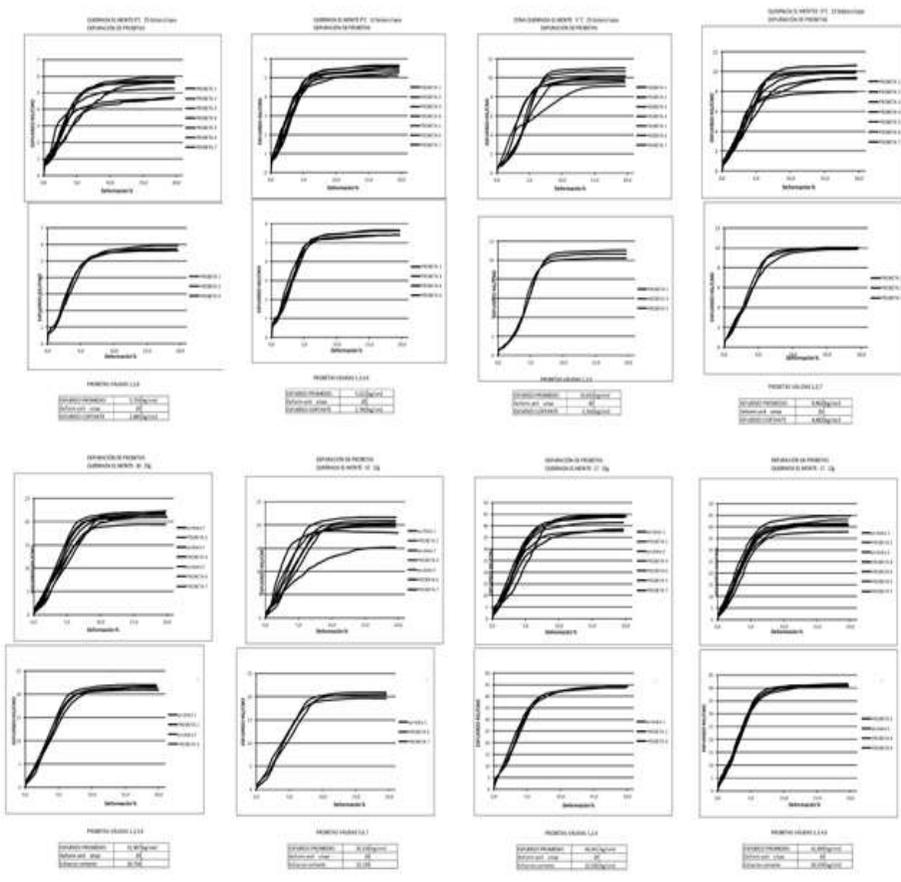
Sin embargo, se debe estudiar en el futuro otros tipos de suelos como: la turba, los limos, arenas gruesas, y otros para ver como reaccionan a la congelación.

4.2.2.4 Esfuerzo vs Temperatura

A continuación se mostrará todas las gráficas resumen, más su respectiva depuración:

4.2.2.4.1 GRAFICAS RESUMEN BANCO 1

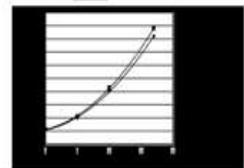
BANCO 1



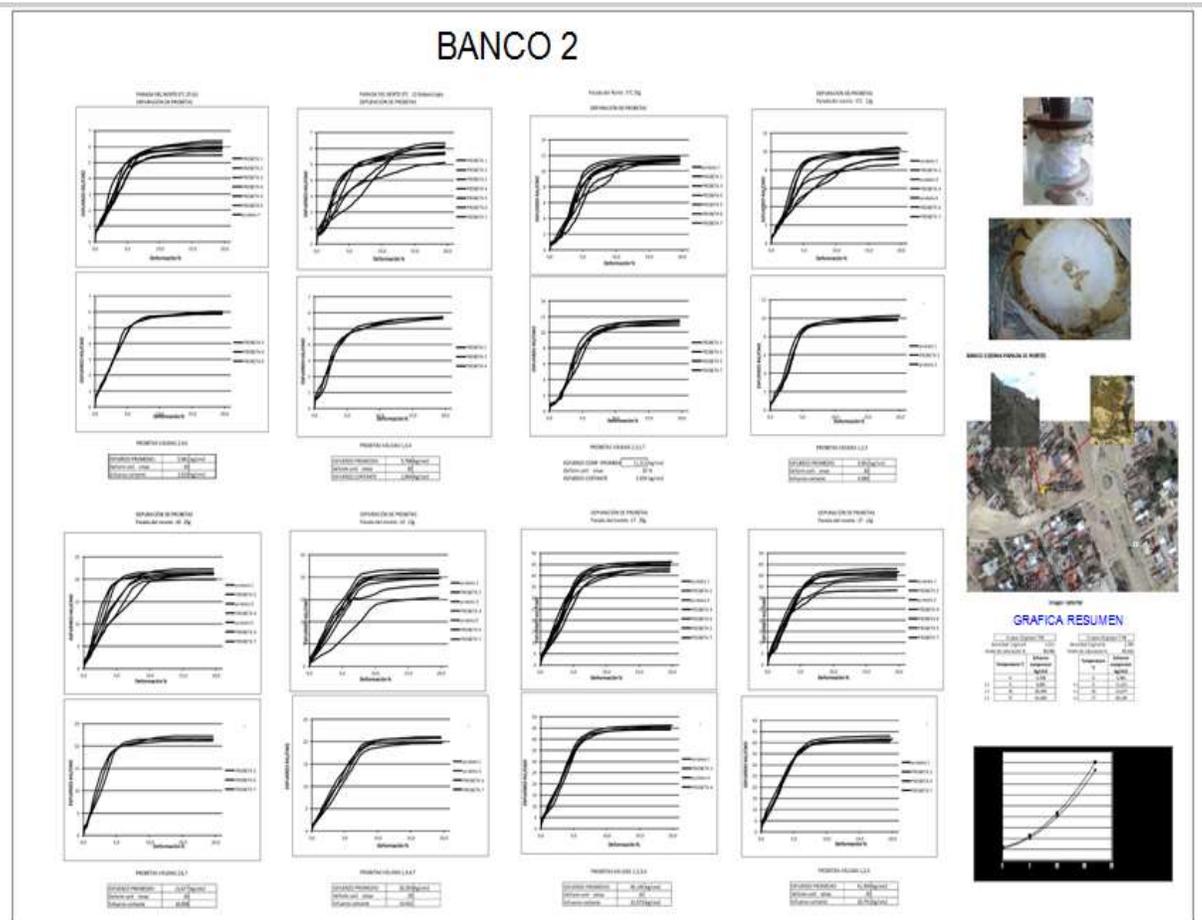
GRAFICA RESUMEN BANCO 1

BANCO 1

Specimen	F _u (MPa)	E _s (MPa)	E _c (MPa)
BANC01-1	31.2	18500	20000
BANC01-2	31.5	18500	20000
BANC01-3	31.8	18500	20000
BANC01-4	32.1	18500	20000
BANC01-5	32.4	18500	20000
BANC01-6	32.7	18500	20000
BANC01-7	33.0	18500	20000
BANC01-8	33.3	18500	20000
BANC01-9	33.6	18500	20000
BANC01-10	33.9	18500	20000
BANC01-11	34.2	18500	20000
BANC01-12	34.5	18500	20000



4.2.2.4.2 GRAFICAS RESUMEN BANCO 2



Como se preveía en la hipótesis, la resistencia a compresión y tracción aumenta notablemente con el aumento negativo de la temperatura, se manifestó diferente para arcillas y arenas como se verá más adelante.

A continuación se presenta las gráficas para cada densidad y banco.

Tabla 5 resumen esfuerzo temperatura banco 1

BANCO 1

3 capas 12 golpes T99		3 capas 25 golpes T-99	
Densidad 1 (g/cm ³)	1,441	Densidad 2 (g/cm ³):	1,729
Grado de saturación %	94,102	Grado de saturación %	88,186
Temperatura °C	Esfuerzo compresion kg/cm ²	Temperatura °C	Esfuerzo compresion kg/cm ²
0	5,521	0	5,759
(-) 5	9,963	(-) 5	10,632
(-) 10	20,318	(-) 10	21,507
(-) 17	41,069	(-) 17	44,041

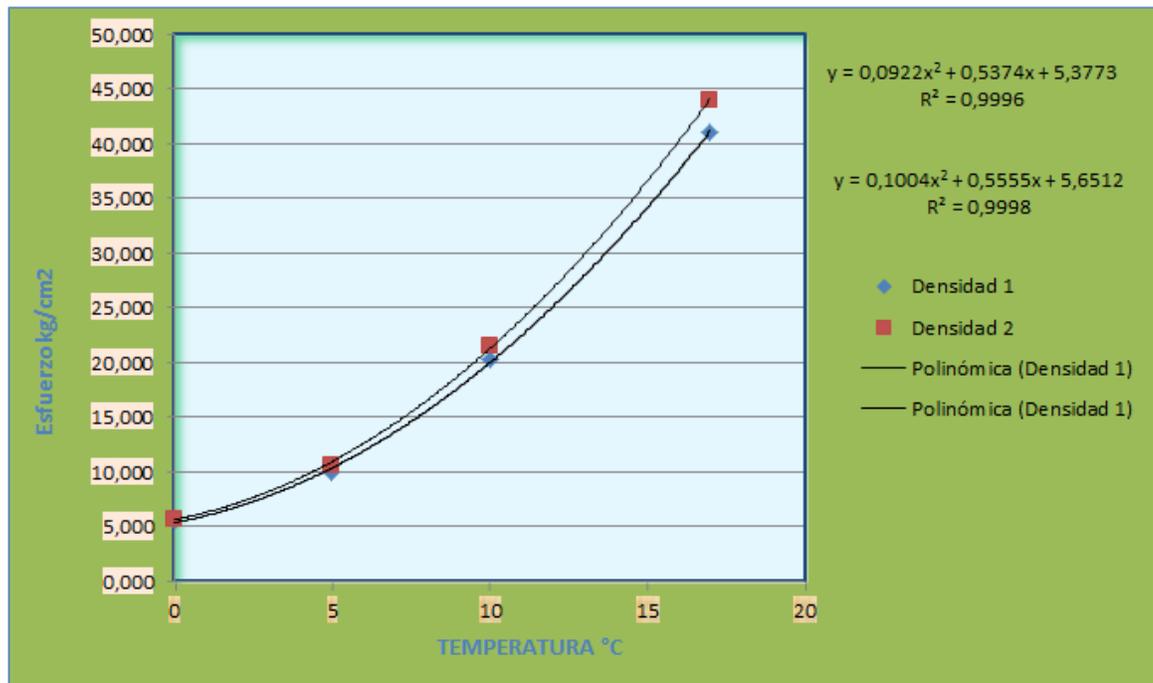


Tabla 6 resumen esfuerzo temperatura banco 2

BANCO 2

3 capas 12 golpes T99

Densidad 1 (g/cm³) 1,511

Grado de saturación % 90,096

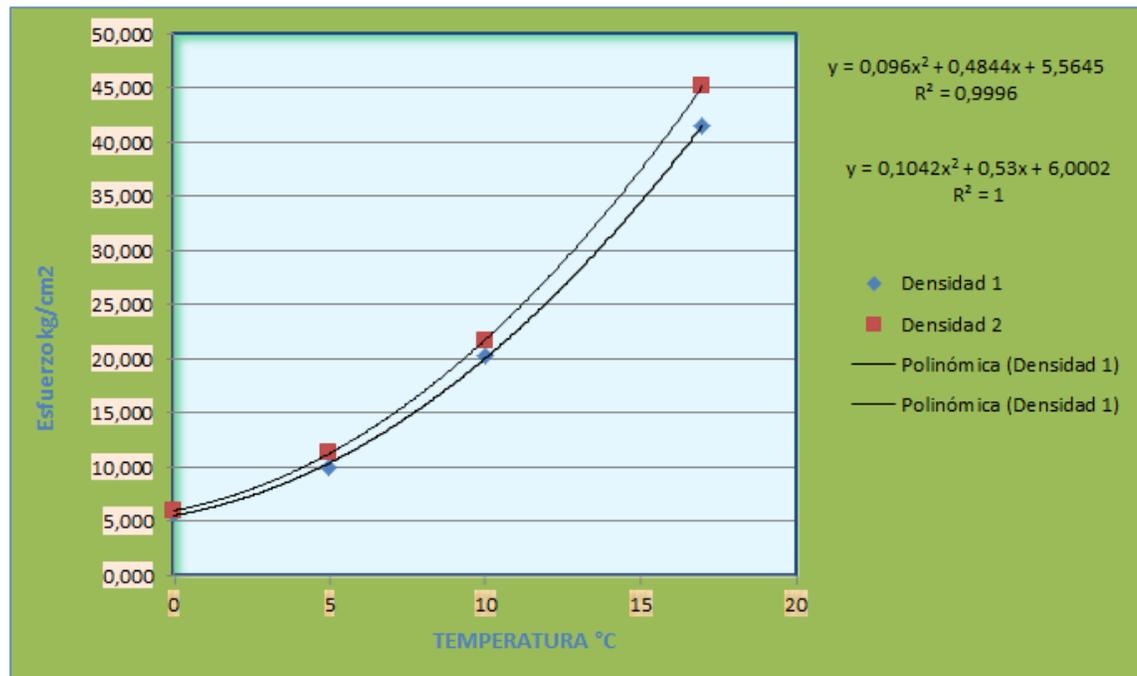
	Temperatura °C	Esfuerzo compresion kg/cm ²
	0	5,708
(-)	5	9,981
(-)	10	20,354
(-)	17	41,454

3 capas 25 golpes T-99

Densidad 2 (g/cm³): 1,765

Grado de saturación % 85,616

	Temperatura °C	Esfuerzo compresion kg/cm ²
	0	5,981
(-)	5	11,311
(-)	10	21,677
(-)	17	45,145



Se observa en la gráfica que las resistencias no varían tanto a pesar que las densidades varían debido a la energía de compactación usada, esto es positivo ya que los suelos naturales no se encuentran con una densidad óptima de compactación.

4.2.3 PRUEBAS DE RESISTENCIA ARENAS CONGELADAS

4.2.3.1 Fallas en pruebas de resistencia

En las pruebas de resistencia en las probetas de arenas congeladas se observó que las fallas que se presentaron fueron similares a las de las arcillas congeladas:

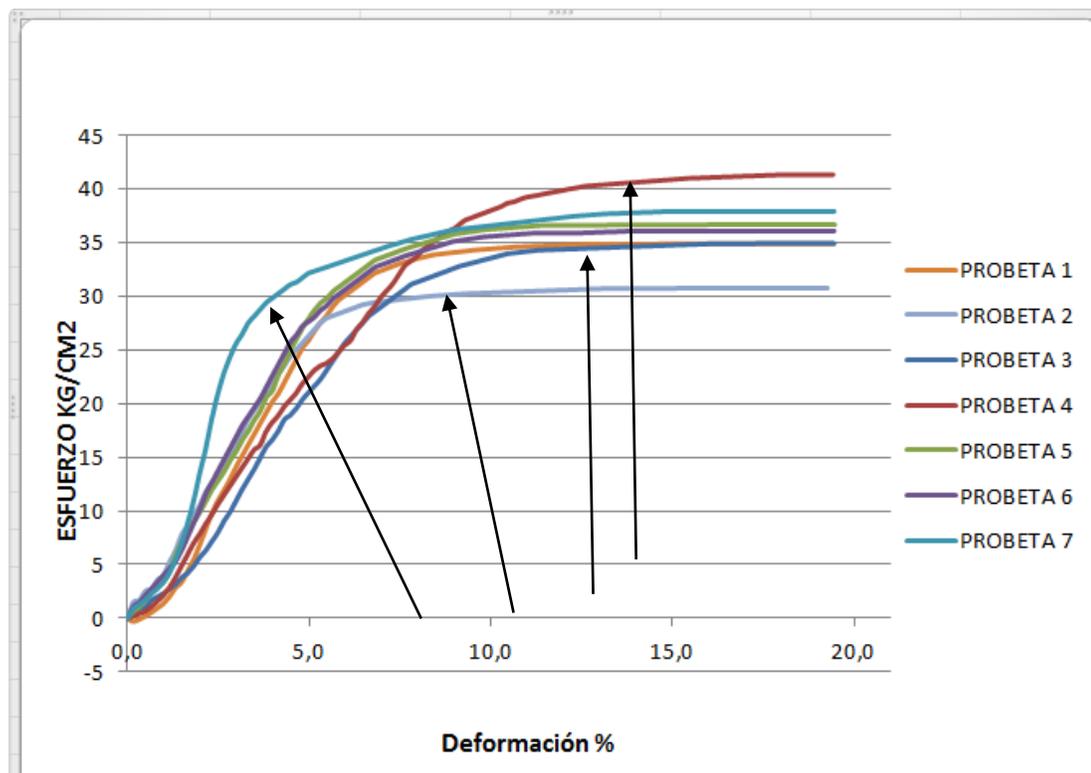


Al igual que en las arcillas la falla se presenta por acción de descongelación en la la parte superior e inferior, tampoco se presenta alteración en la parte central, obteniendo la resistencia máxima al 20% de deformación.

4.2.3.2 DEPURACIÓN DE PROBETAS

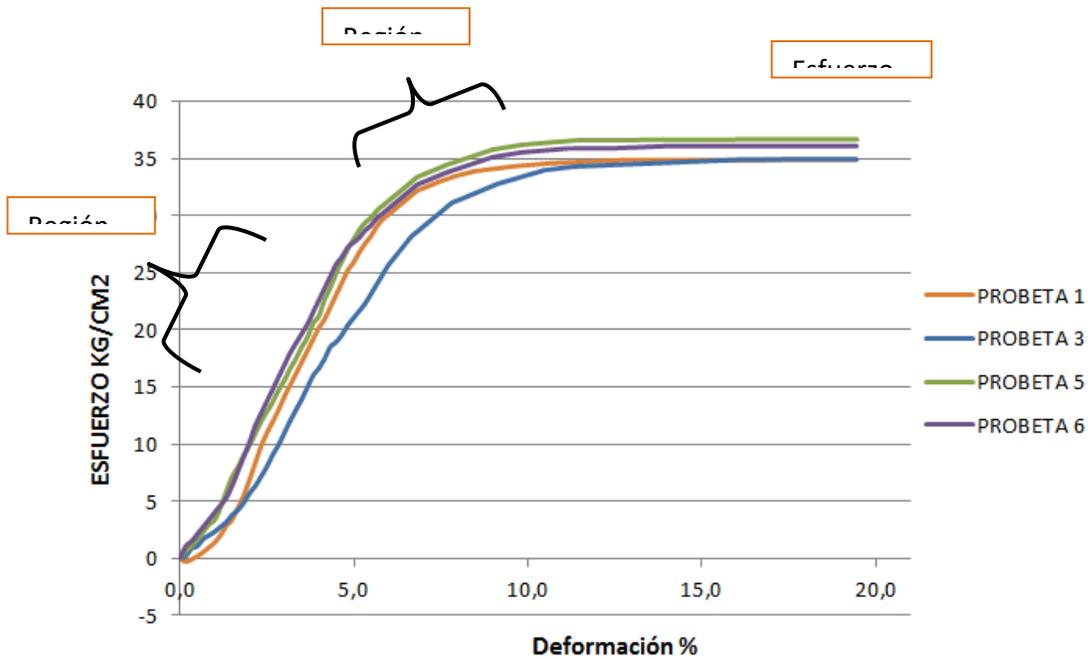
Siguiendo el mismo criterio, claramente se observa las probetas a ser depuradas por su comportamiento diferente:

QUEBRADA EL MONTE -5 °C DEPURACIÓN DE PROBETAS



Probetas

Se siguió el mismo procedimiento para las 8 gráficas resumen de las arenas (anexos)



PROBETAS VÁLIDAS 1,3,5,6

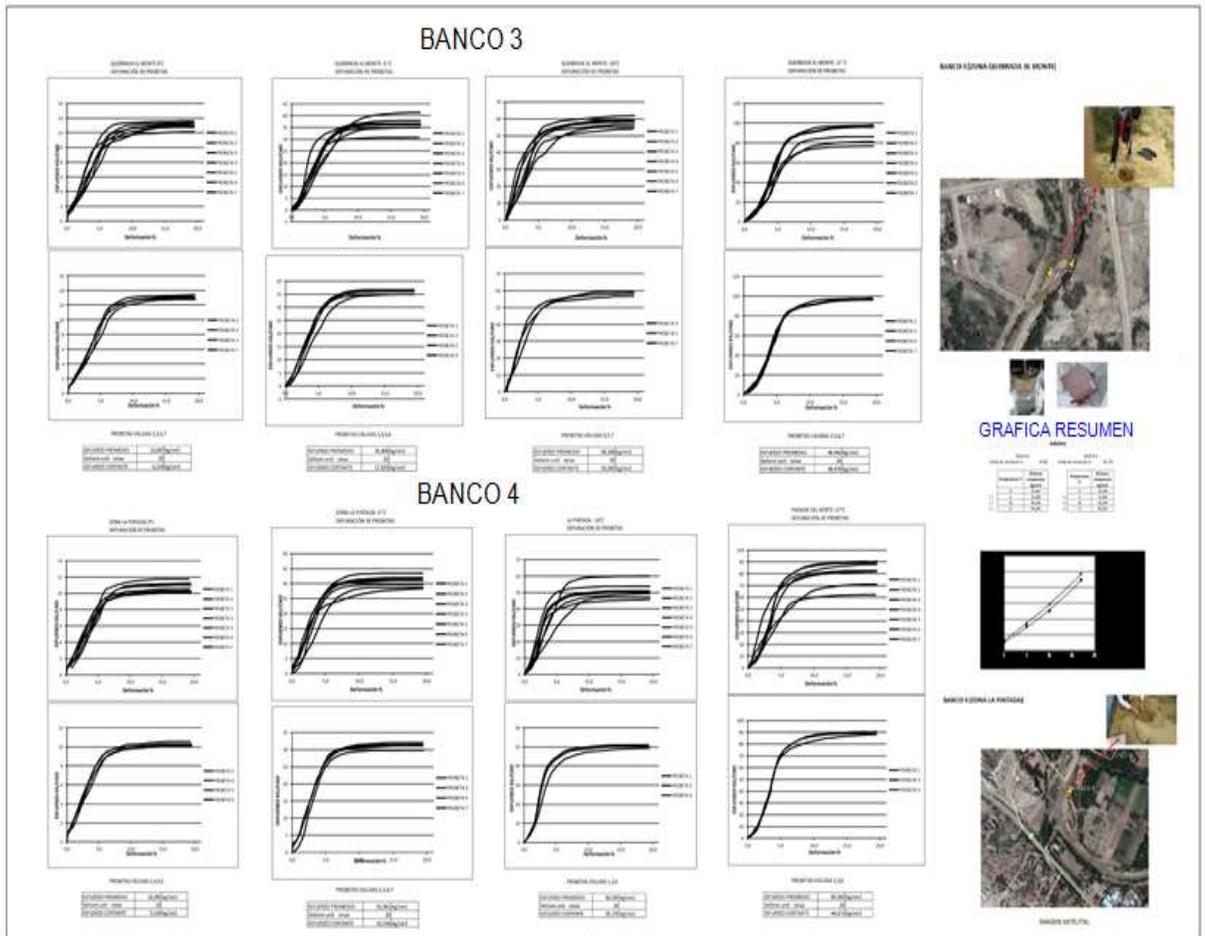
ESFUERZO PROMEDIO:	35,498	kg/cm ²
Deform unit smax	20	
ESFUERZO CORTANTE	17,823	kg/cm ²

Como se observa en una de las gráficas el comportamiento de deformación de las arenas y arcillas congeladas es muy similar.

4.2.3.3 Esfuerzo vs Temperatura

Al igual que de los suelos arcillosos se presentan todas las gráficas resumen de los suelos arenosos congelados:

4.2.3.3.1 RESUMEN GRAFICAS BANCO 3 Y 4



La resistencia a compresión y tracción aumenta notablemente con el aumento negativo de la temperatura en relación a las arcillosas, esto se preveía en la investigación, ya la granulometría es un factor muy importante a la hora de brindar la resistencia en los suelos congelados.

TABLAS RESUMEN 7 ESFUERZO TEMPERATURA BANCO 3 Y 4

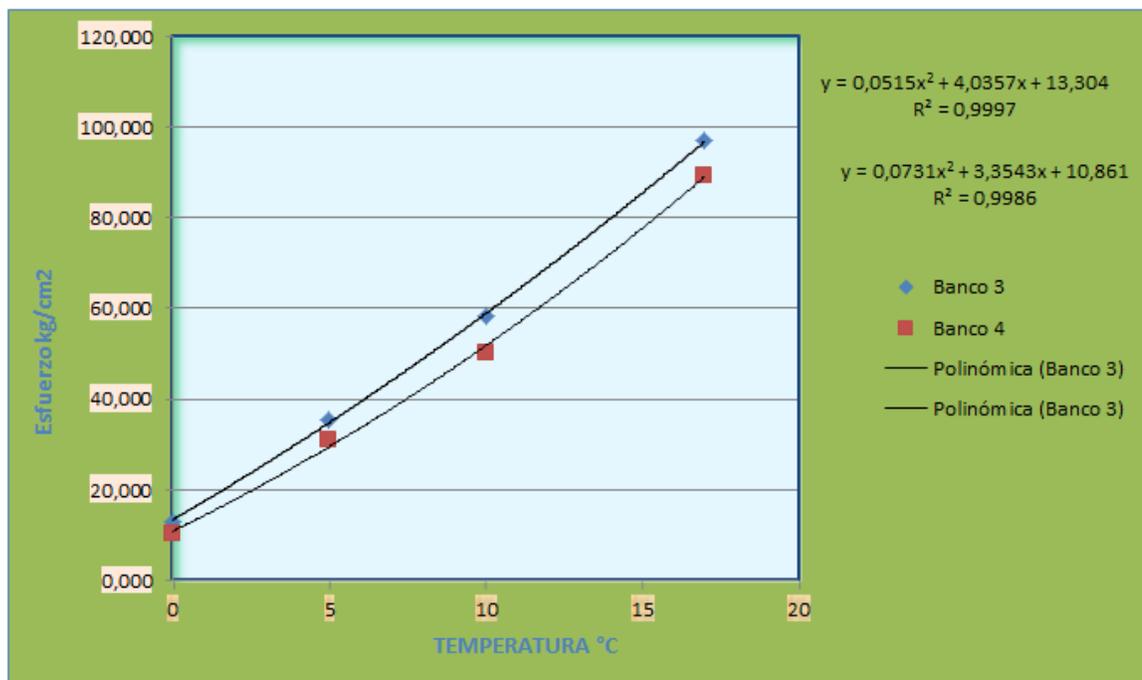
ARENAS

BANCO 3
BANCO 4

Grado de saturación % 87,86
Grado de saturación % 82,735

	Temperatura °C	Esfuerzo compresion kg/cm2
	0	13,047
(-)	5	35,498
(-)	10	58,184
(-)	17	96,940

	Temperatura °C	Esfuerzo compresion kg/cm2
	0	10,296
(-)	5	31,061
(-)	10	50,339
(-)	17	89,342



Se observa que los esfuerzos a compresión son ligeramente inferiores para el banco 4 esto se debe a que el banco 4 tiene una granulometría más fina, en el banco cuatro tiene un 4.92%

de material fino mientras que el banco 3 solo un 2,04, claro que la diferencia mucha como ocurriría con una arena gruesa

	% humedad	% ret 4	% ret 10	% ret 40	% ret 200	Pasa 200
Banco 3	6,46	1,03	1,51	18,2	77,22	2,04
Banco 4	5,21	0	0,09	4,08	95,08	4,92

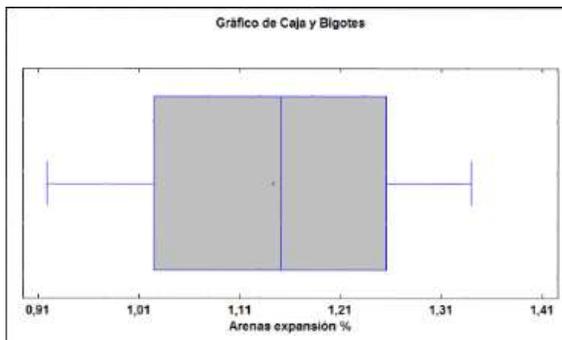
Otra causante de la diferencia de esfuerzos es el grado de saturación, el banco 3 obtuvo un 87.86 % mientras que el banco 4 un 82.73.

EXPANSIÓN

% Expansión suelos Arenosos congelados	
1,003	1,171
0,961	1,129
0,919	1,213
1,045	1,213
1,297	1,129
1,129	1,171
1,129	0,919
1,213	1,339
1,003	1,255
1,171	1,339
1,045	1,129
1,339	1,255
1,297	1,255
0,919	1,003

Resumen Estadístico para Arenas expansión %

Recuento	28
Promedio	1,1425
Desviación Estándar	0,133333
Coefficiente de Variación	11,6703%
Mínimo	0,919
Máximo	1,339
Rango	0,42
Sesgo Estandarizado	-0,50717
Curtosis Estandarizada	-1,0952



Se observa que el aumento de volumen se da en un 1.14% un valor relativamente bajo que no representa un problema.

4.2.3.4 Tabla resumen arenas

ARENAS

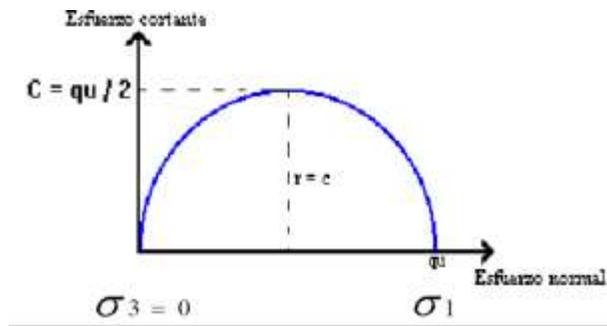
BANCO 3
Grado de saturación % 87,86

	Temperatura °C	Esfuerzo compresion kg/cm2
	0	13,047
(-)	5	35,498
(-)	10	58,184
(-)	17	96,940

BANCO 4
Grado de saturación % 82,735

	Temperatura °C	Esfuerzo compresion kg/cm2
	0	10,296
(-)	5	31,061
(-)	10	50,339
(-)	17	89,342

4.2.4 Cohesión



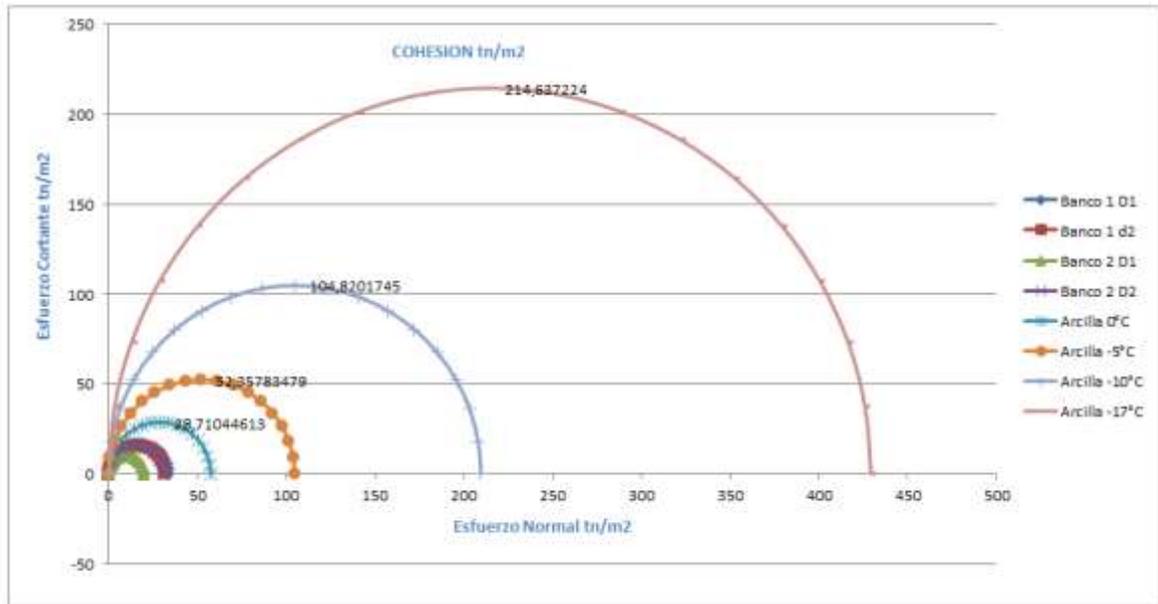
Círculo de mohr

Valores referenciales de Cohesión de diferentes tipos de suelo

TIPO DE SUELO	γ (T/m ³)	c (T/m ²)
Bloques y bolos sueltos	1.70	-
Grava	1.70	-
Grava arenosa	1.90	-
Arena compacta	1.90	-
Arena semicompacta	1.80	-
Arena suelta	1.70	-
Limo firme	2.00	1-5
Limo	1.90	1-5
Limo blando	1.80	1-2.5
Marga arenosa rígida	2.20	20-70
Arcilla arenosa firme	1.90	10-20
Arcilla media	1.80	5-10
Arcilla blanda	1.70	2-5
Fango blando arcilloso	1.40	1-2
Suelos orgánicos (turba)	1.10	-

En el presente estudio se determina la cohesión a partir del círculo de mohr dando los siguientes resultados para los suelos arcillosos tanto congelados y sin congelar:

Suelos Arcillosos:



Como se observa en la gráfica los valores de cohesión para las arcillas no congeladas son bastante bajos a comparación de congeladas y aumentan a nivel que se reduce la temperatura.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Suelos no congelados	No Golpes	cohesión (tn/m2)
Banco 1	12	10,01263406
	25	16,88718816
Banco 2	12	9,942790187
	25	15,76225104

Suelos Congelados

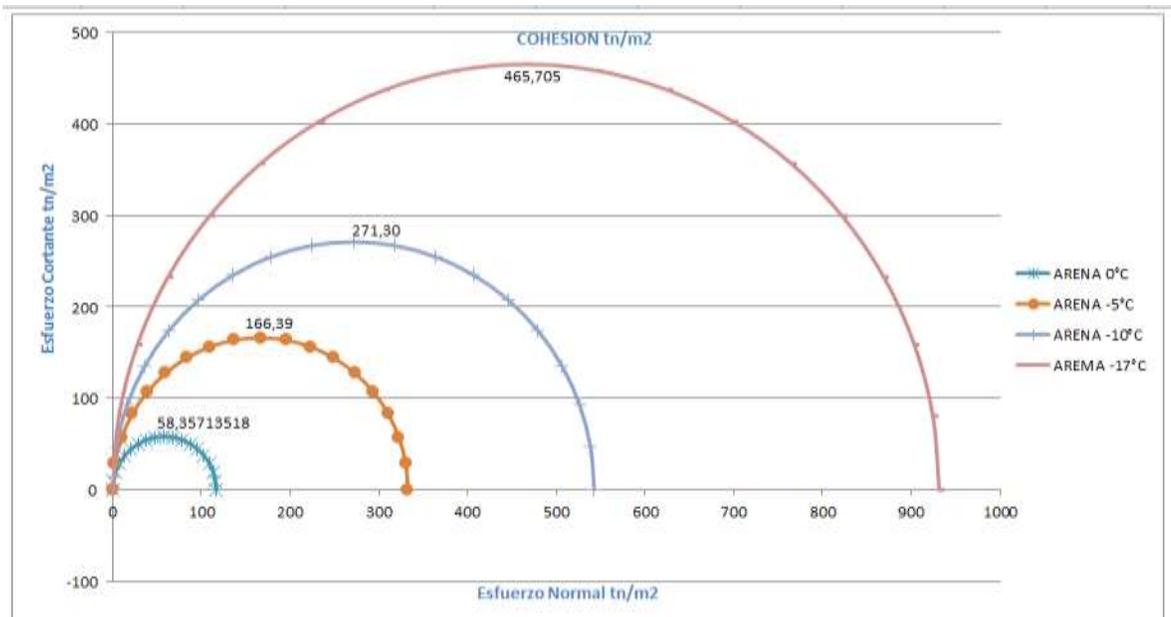
T °C	Cohesión tn/m2
0	28,7104
-5	52,3578
-10	104,8202

-17	214,6372
-----	----------

Como se observa en las dos tablas, el aumento de la cohesión del suelo congelado es muy significativo, superando al suelo sin congelar desde los 0°C hasta un aumento del 1430% aproximadamente.

Suelos Arenosos:

Como se mencionó los suelos arenosos no tienen cohesión, pero gracias a la congelación de suelos, estos adquieren propiedades cohesivas de manera similar a los arcillosos como se muestra en el gráfico de Mohr:



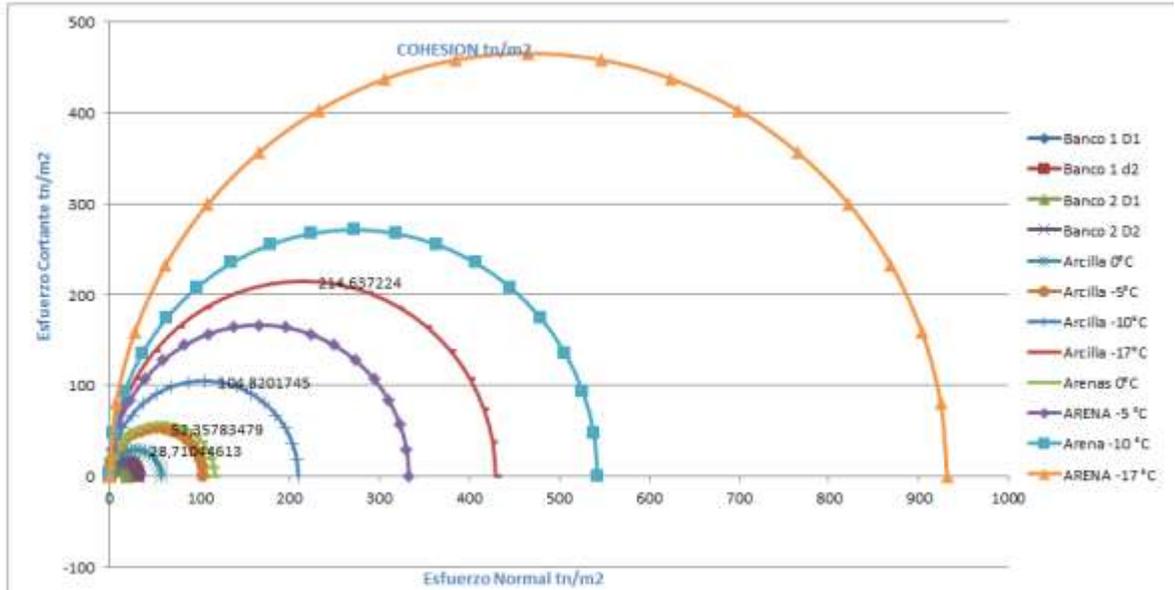
Los valores son bastante elevados, a comparación de un suelo cohesivo arcilloso, margas arenosa, fango blanco y otros. Los valores de cohesión en Tn/m² son los siguientes:

T °C	COHESIÓN tn/m ²
0	214,6372
-5	166,3974
-10	271,3096
-17	465,7052

Los valores aumentan significativamente en función que disminuye la temperatura.

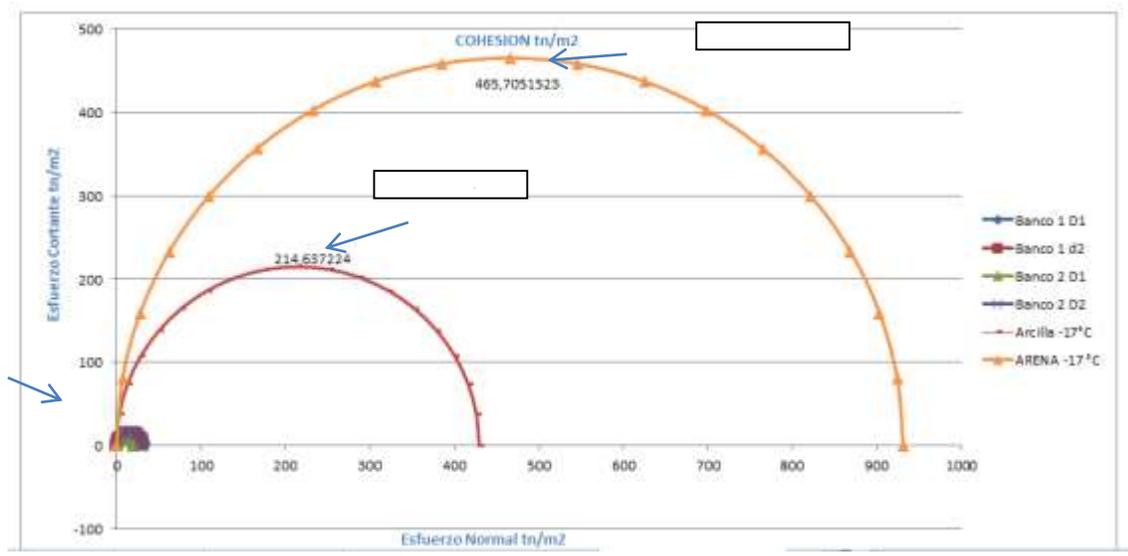
Cohesión de Arcillas vs Arenas

En la siguiente gráfica se muestra los valores de cohesión tanto de arcillas como arenas, donde se observa el aumento de la misma:



Los valores más importantes para la aplicación en obra son los valores que se aproximan a lo que se aplicará en obra, en el caso de este estudio es el de -17°C por lo que a continuación se muestra una comparación entre arcillas sin congelar, arcillas congeladas y arenas congeladas a -17°C.

Coh



Prácticamente los valores de cohesión de las arcillas sin congelar a pesar de no estar saturadas, son incomparables con las arcillas y arenas congeladas.

No Golpes cohesión (tn/m ²)		
Banco 1	12	10,01263406
	25	16,88718816
Banco 2	12	9,942790187
	25	15,76225104

	T °C	Cohesión tn/m ²
ARCILLAS	-17	214,6372
Arenas	-17	465,7052

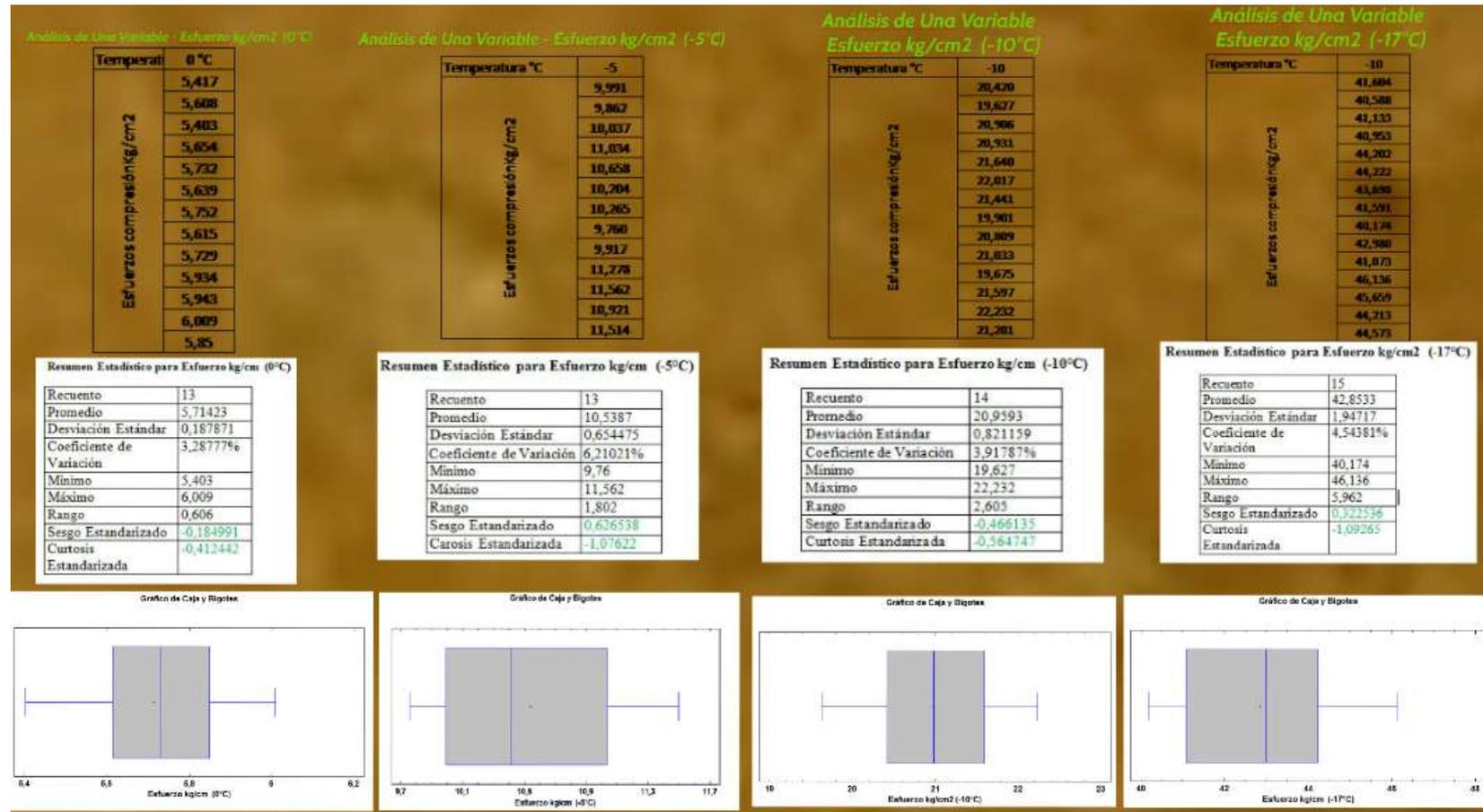
Los valores de cohesión de arcillas y arenas son incomparables con los valores referenciales de los tipos de suelos por lo que nos dan una referencia los altos valores de resistencia al corte que se deben alcanzar para que se produzca una falla cuando la tensión normal es nula, esto brinda mayor seguridad en cualquier tipo de excavación evitando cualquier tipo de deslizamiento gracias al alto valor de resistencia que mantiene unidas las partículas de los suelos.

Al tratarse de resultados que provienen de la compresión inconfiada, la presión lateral se asume igual a cero, la misma que ayuda a resistir los esfuerzos de carga, y al no existir, los valores obtenidos son inferiores a los reales, lo que deja al ingeniero con un margen de seguridad adicional.

Tipo de Suelo	c (tn/m ²)	φ (°)
Blotado o Sólido (arcilla)	1.75	—
Clayey	1.75	—
Clayey (arenosa)	1.75	—
arcilla (no expuesta)	1.75	—
arcilla (construcción)	1.75	—
arcilla (sólida)	1.75	—
Limo (fino)	1.40	1.1
Limo	1.40	1.1
Limo (Medio)	1.30	1.1
arcilla (arenosa) (sólida)	2.20	10-15
arcilla (arenosa) (no)	1.80	10-15
arcilla (sólida)	1.80	8-15
arcilla (sólida)	1.80	5-10
Tamaño estándar arcillas	1.40	5-10
Suelos orgánicos (de 10)	1.30	—

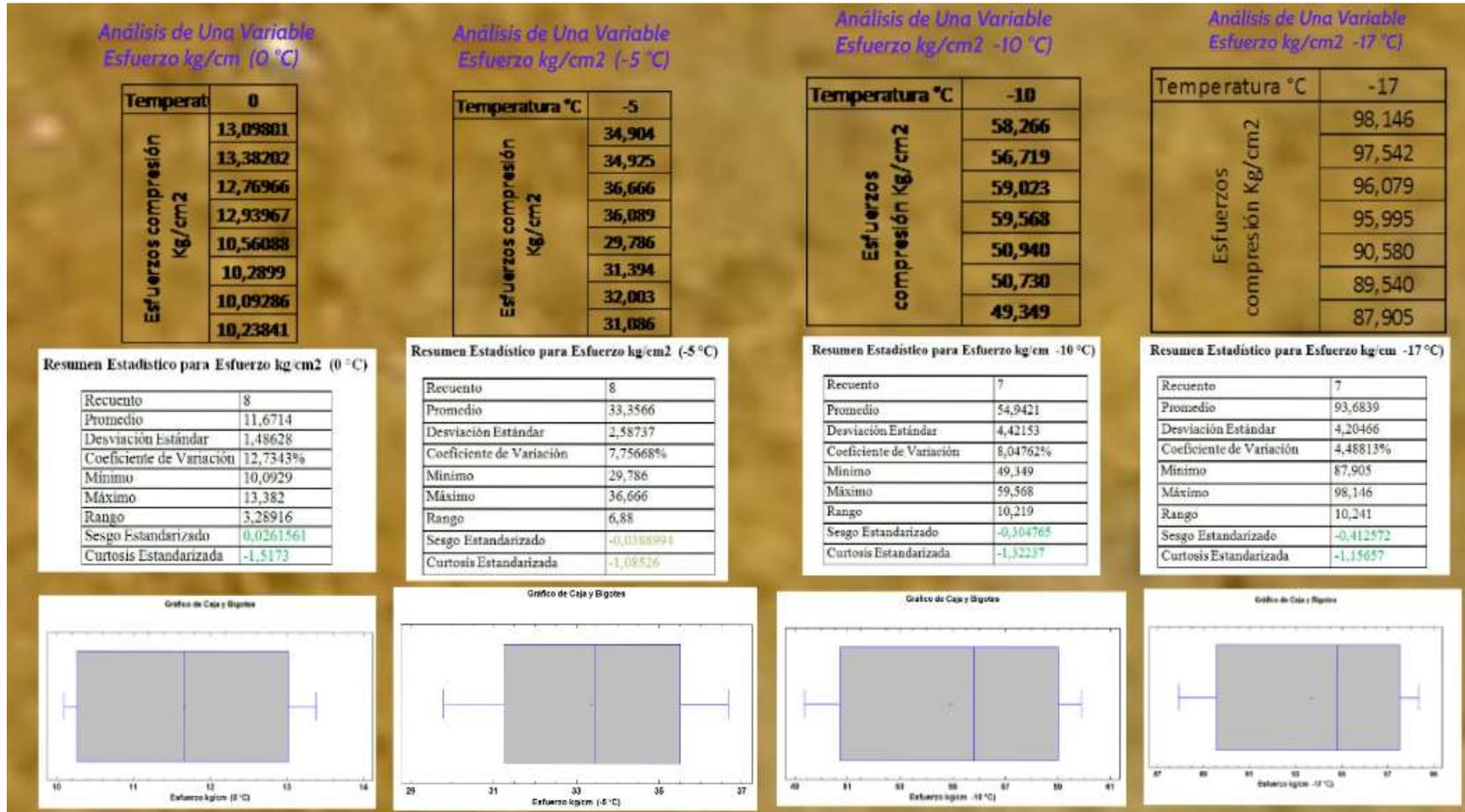
4.2.5 Respaldo estadístico

Suelos arcillosos.

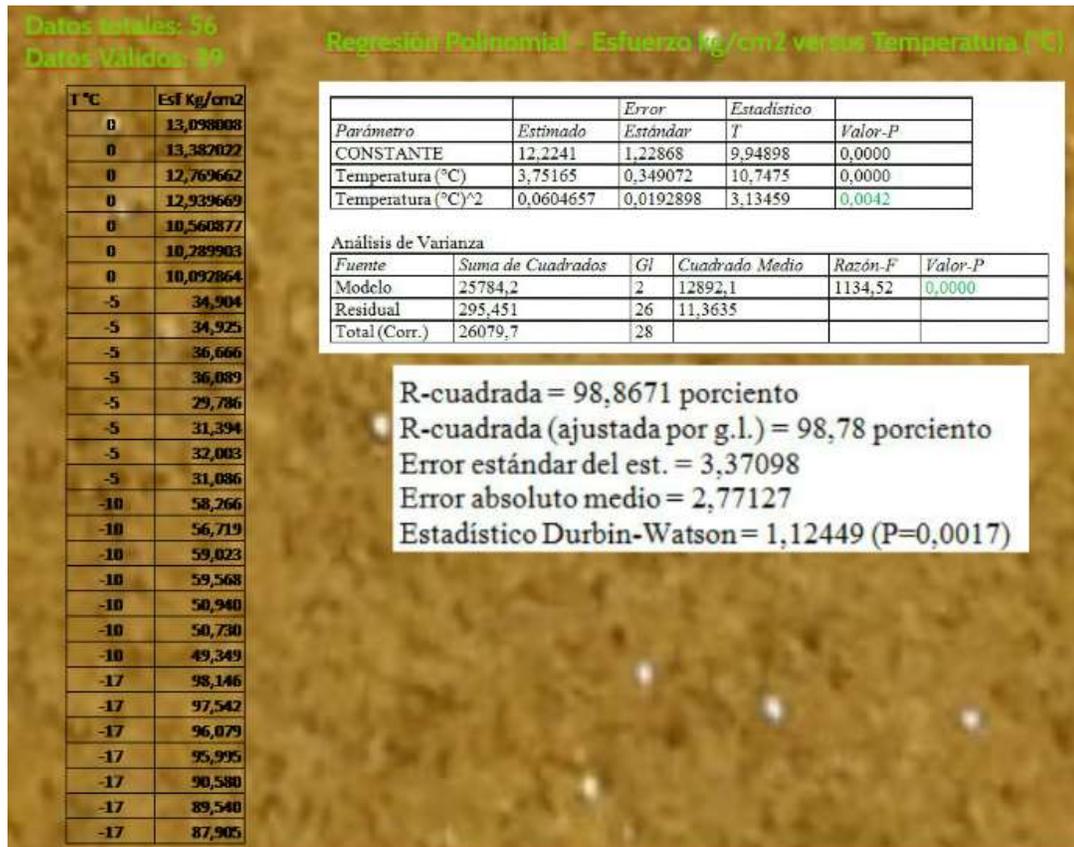


Hasta del 7%, es precisa;
 Entre el 8 y el 14% significa que existe una precisión aceptable;
 Entre el 15 y el 20% precisión regular y por lo tanto se debe utilizar con precaución Mayor del 20% indica que la estimación es poco precisa y por lo tanto se recomienda utilizarla sólo con fines descriptivos (tendencias no niveles).

Suelos Arenosos

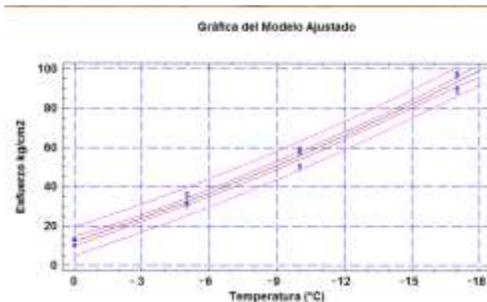


4.2.6 CORRELACIÓN SUELOS ARENOSOS



$$\text{Esfuerzo kg/cm}^2 = 12,2241 + 3,75165 \cdot \text{Temperatura (}^\circ\text{C)} + 0,0604657 \cdot \text{Temperatura (}^\circ\text{C)}^2$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre Esfuerzo kg/cm² y Temperatura (°C) con un nivel de confianza del 95%.



4.2.7 CORRELACIÓN SUELOS ARCILLOSOS

Datos totales: 112
Datos Válidos: 55

Temperatura	0	5	10	17
	5,417	9,991	20,420	41,666
	5,800	9,862	19,677	40,568
	5,403	10,017	20,306	41,133
	5,054	11,034	20,911	40,953
	5,333	10,050	21,040	44,202
	5,639	10,304	22,017	44,332
	5,752	10,365	21,441	43,670
	5,015	9,740	19,901	41,591
	5,729	9,917	20,009	40,136
	5,018	11,720	21,013	43,900
	5,943	11,562	19,675	41,073
	6,009	10,921	21,597	40,136
	5,85	11,514	22,212	40,679
			21,301	44,213
				44,5724

Comparación de estad. Aritméticas:

Método	Correlación R	Cuadrado
Exponencial	0,9905	98,11%
Cuadrado de X	0,9948	98,96%
Raz. Cuadrado de Y	0,9921	98,43%
Cuadrado Doble	0,9954	99,09%
Raz. Cuadrado X Cuadrado X	0,9789	95,82%
Lineal	0,9732	94,71%
Logaritmo Y Raz. Cuadrado X	0,9639	92,91%
Inversa de Y	0,9461	89,31%
Log. Y Cuadrado X	0,9415	88,64%
Raz. Cuadrado Doble	0,9219	84,99%
Cuadrado de Y	0,9165	84,00%
Raz. Cuadrado de X	0,8708	75,83%
Inversa Y Cuadrado X	-0,2182	66,34%
Cuadrado Y Raz. Cuadrado X	0,7777	60,48%
Inversa Y Raz. Cuadrado X	**** apatno ****	
Logaritmo de X	**** apatno ****	
Raz. Cuadrado Y Log X	**** apatno ****	
Multiplicativa	**** apatno ****	
Inversa Y Log X	**** apatno ****	
Cuadrado Y Log X	**** apatno ****	
Inversa de X	**** apatno ****	
Raz. Cuadrado Y Inversa de X	**** apatno ****	
Curva S	**** apatno ****	
Doble Inversa	**** apatno ****	
Cuadrado Y Inversa de X	**** apatno ****	
Logístico	**** apatno ****	
Log. probit	**** apatno ****	

Regresión Simple
kg/cm2 vs. Temperatura °C

dependiente: Esfuerzo kg/cm2
independiente: Temperatura °C
función: $Y = \exp(a + b \cdot X)$

Estadística	Estadística	Valor P
Error	T	0,0000
0,0147667	110,785	0,0000
0,00140668	14,0015	0,0000

Estadística	Valor P
T	0,0000
F	0,00418031
S	

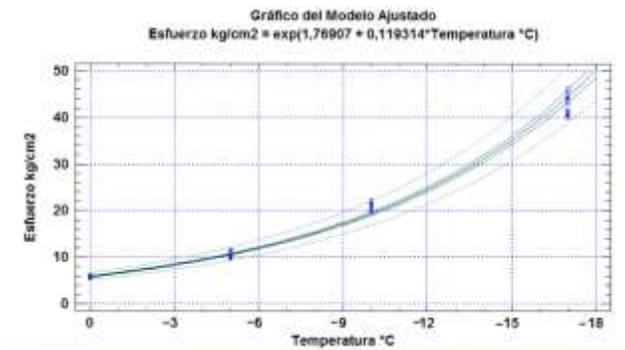
relación = 0,996335
68,4 por ciento
confianza para g.l.) = 99,2546 por ciento
est. = 0,0661839
t = 0,0545614
-Watson = 0,606151 (P=0,0000)

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo exponencial para describir la relación entre Esfuerzo kg/cm² y Temperatura °C. La ecuación del modelo ajustado es

$$\text{Esfuerzo kg/cm}^2 = \exp(1,76907 + 0,119314 * \text{Temperatura } ^\circ\text{C})$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre Esfuerzo kg/cm² y Temperatura °C con un nivel de confianza del 95,0%.

El coeficiente de correlación es igual a 0,996335, indicando una relación relativamente fuerte entre las variables



4.2.8 TABLAS RESUMEN GENERAL

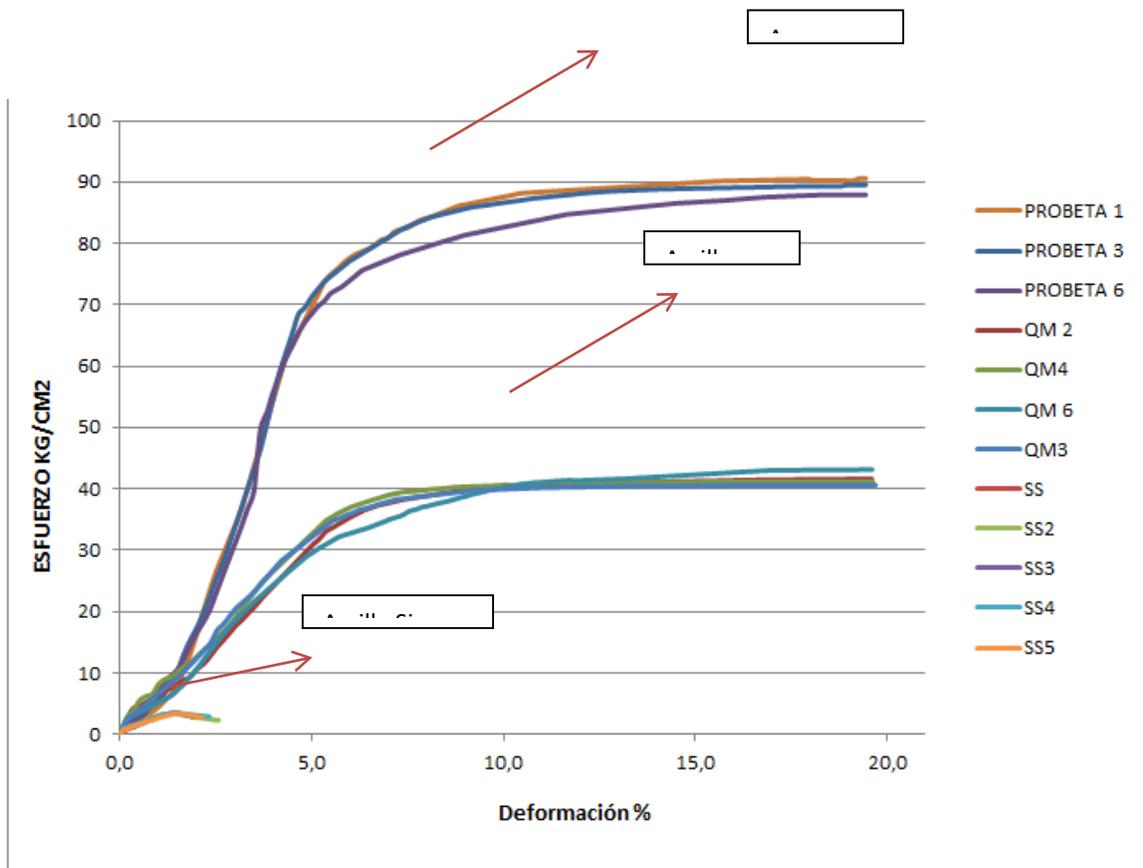
No total de probetas de estudio:

Sin congelar: 45

Congeladas: Arcillosas: 112 Arenosas: 56

TOTAL PROBETAS DE ESTUDIO: 213 Probetas

En la siguiente gráfica se expresa resultados tanto de las arcillas ya arenas congeladas a -17°C y también las arcillas compactas, se observa la gran diferencia de resistencia.



Correlación Final Arcillas vs Arenas congeladas

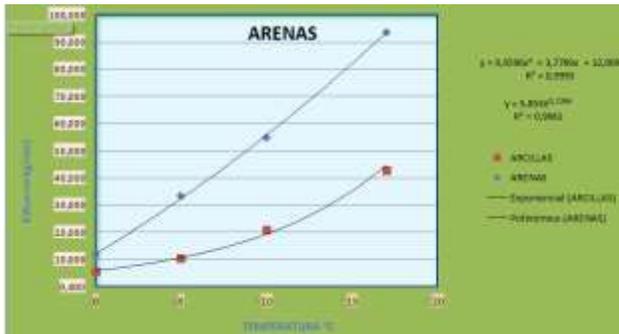


TABLA 8 RESUMEN GENERAL DEL ESTUDIO ESFUERZO VS TEMPERATURA

ARCILLAS

Temperatura °C	Esfuerzo compresion kg/cm2
0	5,710
-5	10,530
-10	20,950
-17	42,850

ARENAS

Temperatura °C	Esfuerzo compresion kg/cm2
0	11,671
-5	33,350
-10	54,940
-17	93,680

En las tablas resumen se puede observar que:

Los esfuerzos aumentaron a medida que disminuye la temperatura, si bien los esfuerzos obtenidos para arcillas rondan los 45 kg/cm2 mientras que para las arenas los 95 kg/cm2. La razón de la gran diferencia se resume en aspectos puntuales:

- La arcilla tiene un punto de congelación mas baja que la de las arenas.

- La granulometría y la fricción de las arenas hacen determinante el aumento de resistencia, según la teoría las arenas gruesas alcanzan hasta el doble de la resistencia de las arenas finas que se estudio.

Los estratos a pesar de estar saturados en su estado de congelación prácticamente son impermeables, en la rotura a temperaturas de 0 -5 hasta -10 se observó que a la perdida de resistencia y asentamiento se producía el escurrimiento de agua, pero las probetas con temperaturas de – 17 grados si el agua escurría unos 5 cm y se volvía a congelar por la baja temperatura de la probeta. En obra las resistencias son mayores ya que los sistemas mantienen la temperatura a través de las tuberías, lo que no pasaba en laboratorio,

ARCILLAS

Temperatura °C	Esfuerzo compresion kg/cm2	% de incremento respecto al suelo sin congelar
0	5,710	175,15
-5	10,530	323,01
-10	20,950	642,64
-17	42,850	1314,42

ARENAS

Temperatura °C	Esfuerzo compresion kg/cm2	% de incremento respecto a las arcillas congeladas
0	11,671	204,4032756
-5	33,350	316,71415
-10	54,940	262,2434368
-17	93,680	218,6231039

Como se observa en las tablas el incremento del porcentaje en las arcillas congeladas aumenta hasta en un 1300% en relación a las arcillas sin congelar, y las arenas en función de las arcillas congeladas aumentan para cada temperatura en el rango de 200 a 300% .

CAPITULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- El aumento de la resistencia a compresión como la cohesión son muy significativos, comparado con los ensayos realizados sin congelar, se habla de un aumento del 1300%, estos valores nos dan una referencia para cálculos de las máximas cargas permisibles de acuerdo a cada tipo de obra, además que los valores encontrados en el presente proyecto se los realizó mediante compresión encofinada, por lo que los valores con algo más bajos que los reales, lo que le brinda un margen de seguridad.
- Los suelos arenosos obtuvieron mayores valores de resistencia a compresión para cada temperatura estudiada, el aumento más significativo resulto para la temperatura de -5°C donde se obtuvieron un incremento de 316% respecto a las arcillas congeladas y a una temperatura de -17°C se dio en un 218%.
- La densidad del suelo no resulta un problema al momento de aplicar el método ya se observó que cuando menos densos están obtienen mayor grado de saturación, y viceversa, ya que para grados de saturación mayores se obtienen mayores resistencia, esto se ve compensado obteniendo valores similares de resistencia.
- Los suelos saturados al ser congelados no resultan un problema a la hora de evaluar su expansión volumétrica, ya que se registraron expansiones en el rango de 0.85 para arcillas y 1.1% para arenas, de haber sido expansiones mucho mayores podrán haberse fracturado produciendo grietas y se vería reflejado en obra, lo que no sucedió.
- El presente estudio se lo realizó logrando hasta la temperatura de -17°C , en obra las empresas dedicadas a congelación elevan dependiendo cada tipo de proyecto desde -20 a -30°C a consecuencia las resistencias se elevaran aún más lo que las hacen comparadas con el hormigón.
- En nuestro medio aun parece muy difícil la aplicación del método ya que las empresas que brindan el servicio necesitan de mucha especialidad debido a que estas brindan un estudio completo en cada caso particular. El costo de cada obra es muy particular, debido a las características como: estratos de suelo, contaminación, propiedades de los suelos como granulometría, humedad, permeabilidad de cada estrato, niveles estacionales del contenido de agua, análisis térmico que va ligado a la energía que se utilizará para la congelación, análisis hidráulico relacionado a las

velocidades de las aguas (estáticas o móviles), métodos de perforación a usar, distancia de tuberías de congelación y otros.

5.2 RECOMENDACIONES

- En primer lugar una recomendación muy importante para futuros estudios es la implementación del laboratorio de suelos de la Universidad Autónoma Juan misael Saracho para estudiar más a fondo el tema, empezando por la compra de equipos que descendan hasta temperaturas de -40°C , para no tener que buscar cámaras de refrigeración particulares, lo que dificulta la investigación.
- Por la amplitud del tema se recomienda relizar investigaciones tomando en cuenta los siguientes criterios; congelación bajo distintos grados de saturación, estudios del calor específico y conductividad térmica de diferentes tipos del suelo, Permeabilidad de distintas zonas del departamento de Tarija, Análisis de la resistencia de limos, arenas gruesas, Arenenas arcillosas congeladas.
- Una vez que se tenga la suficiente información brindarla a empresas para que tengan el adecuado conocimiento del tema para futuras inversiones, para que brinden el servicio de la congelación, actualmente en Bolivia se utiliza el nitrógeno líquido para congelar alimentos, ganadería, medicina, pero no es aplicado en la rama de la ingeniería civil.
- Es recomendable realizar varias evaluaciones visuales de la saturación de los suelos, realizando cortes horizontales y verticales en las probetas para ver la homogeneidad de la saturación, así también realizar el mismo procedimiento para las probetas congeladas evaluando la temperatura en el centro de las mismas y en la superficie.
- Las probetas elaboradas deben ser protegidas en especial si se romperan sin ser saturadas ni congeladas, deben ser introducidas en conservadoras protegiendo de este modo su humedad y su forma.
- El control de las probetas como ser peso, temperatura, dimensiones se lo debe realizar en cámara o de manera rápida en laboratorio para no obtener pérdida de temperatura significativa, por la experiencia del estudio es recomendable transportar las muestras un grado $^{\circ}\text{C}$ inferior al que se pretenda estudiar.